

L'environnement pratique

Évaluation de la compaction des sols par la méthode TDR

Manuel d'utilisation



Office fédéral de
l'environnement,
des forêts et
du paysage
OFEFP

**Évaluation
de la compaction
des sols par
la méthode TDR**

Manuel d'utilisation

**Publié par l'Office fédéral
de l'environnement, des forêts
et du paysage OFEFP
Berne, 2005**

Valeur juridique de cette publication

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEFP en tant qu'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et permet ainsi une application uniforme de la législation. Les aides à l'exécution (appelées aussi directives, instructions, recommandations, manuels, aides pratiques) paraissent dans la collection « L'environnement pratique ».

Ces aides à l'exécution garantissent l'égalité devant la loi ainsi que la sécurité du droit, tout en favorisant la recherche de solutions adaptées aux cas particuliers. Si l'autorité en tient compte, elle peut partir du principe que ses décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions ne sont pas exclues; selon la jurisprudence, il faut cependant prouver leur conformité avec le droit en vigueur.

Editeur

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP)
L'OFEFP est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC)

Auteur

Abdallah Alaoui, chef du projet, Université de Berne

Référence

ALAOUI, A., 2005: Evaluation de la compaction des sols par la méthode TDR. Manuel d'utilisation. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 74 p.

Conseillers OFEFP

Daniel Zürcher,
Service des technologies environnementales
Jean-Pierre Clément, section sol

Graphisme, mise en page

Abdallah Alaoui

Photo couverture

Abdallah Alaoui

Traduction

Andreas Helbling

Téléchargement du fichier PDF

<http://www.buwalshop.ch>
(il n'existe pas de version imprimée)
Référence: VU-4816-F

© OFEFP 2005

Table des matières

Abstracts	5	3.9	Traitement des données et création de graphes	35
Avant-propos	7			
Introduction	9			
1 Cadre général	11	4 Interprétation des résultats	37	
1.1 Objectifs	11	4.1 Interprétation de base	37	
1.2 A qui s'adresse ce manuel ?	11	4.1.1 Principales classes	37	
1.3 Organisation et planification	12	4.1.2 Classes intermédiaires	38	
1.4 Points importants	13	4.1.3 Analyse détaillée des processus hydrodynamiques	38	
2 Vue d'ensemble	15	4.2 Exemples d'application	39	
2.1 Description des appareils utilisés	15	4.2.1 Détermination de la compaction en référence à un sol témoin non compacté	39	
2.1.1 La foreuse	15	4.2.2 Détermination de la compaction en référence au test oedométrique déterminé au laboratoire	44	
2.1.2 Le système TDR	15	4.3 Tentative de classification de la compaction	51	
2.1.3 Les sondes TDR	18			
2.1.4 Le simulateur de pluie – UNI Berne	19			
2.1.5 L'ordinateur portable	19			
2.2 Coûts d'investigation	19	5 Conclusions	53	
2.3 Limites d'application	20			
2.4 Prescriptions de sécurité	20	Annexes	55	
2.5 Où se procurer les appareils de mesure ?	20	A1: Time Domain Reflectrometer	55	
3 Technique et mise en oeuvre	21	Principe	55	
3.1 Forage diagonal des trous pour l'insertion des sondes TDR	21	Calibration according to Roth et al. (1990)	56	
3.1.1 Procédure	21	References	57	
3.2 Calibration des sondes TDR – programme PCTDR	22	Program for one TDR probe	58	
3.3 Mesure de la teneur en eau – Programme PC208W 3.1	24	Program for three TDR probes	60	
3.4 Essais d'irrigation	28	Program for five TDR probes	63	
3.4.1 Insertion des sondes	28	A2: TDR system: Connection between TDR system components	68	
3.5 Disposition des appareils de mesure avant l'irrigation	29	A3: Proposed methodology to investigate a dual-porosity medium	69	
3.5.1 Humidité du sol et irrigation	29			
3.5.2 Nombre d'essais par point de mesure	30	Index	71	
3.6 Installation du simulateur de pluie – UNI Berne	30	1 Liste des figures	71	
3.6.1 Avant d'aller sur le terrain	30	2 Liste des tableaux	72	
3.6.2 Sur le terrain	31	3 Références bibliographiques	73	
3.6.3 En cas de dysfonctionnement	32	4 Remerciements	74	
3.7 Visualisation de la courbe de la teneur en eau	34			
3.8 Sauvegarde des résultats dans un fichier	35			

Abstracts

E

Keywords:

instruction manual
soil compaction
soil moisture
hydrodynamic re-
sponse
time domain reflecto-
metry

A new, direct and non-destructive method, allowing the evaluation of the effect of the compaction on soil structure was proposed. It is based on soil moisture measurements via TDR method (Time Domain Reflectometry).

This manual brings together the instructions necessary to investigate the compaction in terms of technical and scientific aspects. A detailed description of the material and its use was presented.

Three-*in situ*-case studies have served as basis for the analysis of the hydrodynamic processes. It was demonstrated that the determination of the contribution part of big pores, called 'macropores' is decisive in the evaluation of soil compaction.

D

Stichwörter:

Benutzerhandbuch
Bodenschadverdich-
tung
Bodenwassergehalt
hydrodynamische
Reaktion,
TDR (Time Domain
Reflectometry)

Eine neue, direkte und nicht-destruktive Methode zur Beurteilung der Folgen der Bodenschadverdichtung auf die Bodenstruktur wurde vorgeschlagen. Sie basiert auf der Wassergehaltsmessung mit der TDR-Methode.

In diesem Benutzerhandbuch ist das Vorgehen für die Untersuchung der Bodenschadverdichtung sowohl in technischer als auch wissenschaftlicher Hinsicht beschrieben. Das Material und seine Anwendung wird detailliert erklärt.

Die Analyse der hydrodynamischen Prozesse im Boden wurde an drei *in-situ*-Fallbeispielen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass für die Beurteilung der Bodenschadverdichtung die Bestimmung des Beitrages der grossen Poren (Makroporen genannt) am Wassertransport entscheidend ist.

F

Mots-clés:

manuel d'utilisation
compaction des sols
teneur en eau
réponse hydrodynami-
que
TDR (Time Domain
Reflectometry)

Une nouvelle méthode, directe et non destructive, permettant l'évaluation de l'effet de la compaction sur la structure du sol a été proposée. Elle est basée sur des mesures de teneurs en eau par la méthode TDR (*Time Domain Reflectometry*). Le présent manuel rassemble les instructions à suivre pour l'investigation de la compaction tant sur le plan technique que scientifique. Une description détaillée du matériel et de son utilisation a été présentée. L'analyse des processus hydrodynamiques a été effectuée sur la base de trois exemples d'application *in situ*. Il a été démontré que la détermination de la part de contribution des grands pores, appelés 'macropores', au transport d'eau est décisive dans l'évaluation de la compaction des sols.

I

Parole chiave:

manuale d'istruzione
compattazione del
suolo
tenore di acqua
Risposta idrodinamica
TDR (Time Domain
Reflectometry)

È stato proposto un nuovo metodo diretto e non distruttivo, che permette di valutare l'effetto della compattazione sulla struttura del suolo. Tale metodo si basa sulla misurazione del tenore d'acqua mediante l'applicazione del TDR (*Time Domain Reflectometry*). Il presente manuale contiene le istruzioni da seguire per analizzare la compattazione sul piano tecnico e scientifico. È stata presentata una descrizione dettagliata del materiale e dell'utilizzazione fatta. L'analisi dei processi idrodinamici è stata eseguita sulla base di tre esempi di applicazione *in situ*. È stato possibile provare che la determinazione del contributo al trasporto dell'acqua fornito dai grandi pori (i cosiddetti macropori) è stata decisiva ai fini della valutazione della compattazione del suolo.

Avant-propos

La protection des sols contre les atteintes physiques, en particulier les atteintes persistantes résultant de la compaction des sols, a été renforcée et précisée lors de la révision de l'Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol du 1^{er} juillet 1998, RS 814.12). L'article 6 intitulé prévention de la compaction et de l'érosion met l'accent sur l'obligation de prendre toutes les mesures aptes à prévenir les compac-tions qui pourraient menacer la fertilité du sol à long terme. Les cantons sont char-gés de la mise en œuvre de l'OSol, ils doivent surveiller les sols dans les régions où il est établi ou dans les régions où l'on peut craindre l'existence d'atteintes physi-ques graves. La Confédération doit veiller à ce que les cantons disposent des bases techniques (valeurs de référence, méthodes et instruments) nécessaires à l'accom-plissement de leurs tâches de surveillance et d'évaluation.

L'évaluation du degré de compaction d'un sol et des effets qui en découlent est une tâche relativement nouvelle qui nécessitera encore beaucoup de travaux de recher-ches et de développement. Le présent manuel résulte d'un projet financé par le fond de promotion des technologies environnementales de l'OFEFP et attribué à l'Institut de géographie de l'Université de Berne pour mettre au point un système d'évaluation non destructive et in situ de la compaction du sol. La méthode permet d'investiguer les processus hydrodynamiques sur l'intégralité du profil d'un sol et sans occupation prolongée du terrain.

Nous espérons que cette contribution à l'évaluation de la compaction des sols rencontrera l'intérêt de tous les milieux concernés par la prévention des atteintes physiques portées aux sols et quelle permettra de mettre en évidence d'éventuelles atteintes qui pourraient survenir dans le cadre des activités du génie civil ou de l'agriculture.

Office fédéral de l'environnement
des forêts et du paysage

Georg. Karlaganis
Chef de la division Substances, sol et
biotechnologie

Introduction

La compaction est le réarrangement des particules du sol sous l'effet d'une pression externe se traduisant par l'augmentation de la densité, elle est généralement accompagnée d'une importante diminution de la conductivité hydraulique (Guerif et al., 2001). La compaction ne se limite pas à la couche de travail du sol, mais excède celle-ci. La compaction entraîne une dégradation de la structure du sol, une pénétration plus difficile des racines et une diminution de la porosité drainable qui permet la percolation de l'eau et assure l'aération du sol. Le tassement quant à lui, peut survenir naturellement. De manière naturelle, le sol se consolide sous son propre poids; pour la plupart des sols, il n'est donc pas surprenant de constater une augmentation de la densité du sol avec la profondeur. **Pour éviter toute confusion, le terme de compaction sera utilisé tout le long de ce manuel.**

D'un point de vue hydrodynamique, la classification des pores (importance, taille) peut être effectuée à partir de la courbe caractéristique de l'humidité du sol. Cette courbe associe le potentiel capillaire de l'eau du sol (ou potentiel matriciel Ψ) à l'humidité du sol θ .

Dans les pores de grande taille, l'interface air-fluide n'est pas contrôlée par des forces capillaires. Le terme de porosité capillaire a été donc utilisé pour distinguer les pores susceptibles de retenir l'eau contre l'action de la gravité de ceux où l'eau s'écoule librement sans être retenue; ces derniers, appelés macropores, constituent la porosité non capillaire. Par ailleurs, les pores capillaires ou micropores, constituant la matrice, retiennent l'eau même quand le sol atteint sa capacité de stockage après drainage des macropores.

Dans cette étude, la définition morphologique des pores de grande taille et la distinction entre 'mésopores' et macropores ne seront pas abordées. Seul le comportement hydrodynamique est retenu pour caractériser ces larges pores, appelés macropores tout le long de ce travail (Mdaghri-Alaoui, 1998).

Le problème de la compaction du sol a été appréhendé par différentes approches telles que la mesure de la résistance du sol à la pénétration, des infiltrations au bleu de méthylène ou encore par des mesures de la densité et de la porosité, largement utilisées dans ce domaine.

Deux inconvénients majeurs liés à ces deux derniers paramètres sont à noter: 1) ils varient d'un sol à un autre et par conséquent, ne permettent pas une comparaison entre différents types de sol; 2) ils ne prennent en considération que la matrice du sol et ne permettent pas l'évaluation de la structure grossière.

Pour remédier à ces inconvénients, une méthode directe et non destructive consistant à mesurer la teneur en eau par la méthode TDR (*Time Domain Reflectrometer*) a été proposée (Alaoui, 2002).

Les avantages de cette méthode sont résumés comme suit:

- C'est une méthode non destructive. Applicable *in situ*, elle permet l'investigation d'un sol dans son état réel sans provoquer sa perturbation. Cette manière de faire permet la comparaison entre différents types de sol.
- Elle permet d'évaluer les principales fonctions de la structure du sol qui sont le transport d'eau et l'aération et considère la matrice et la macroporosité.
- Elle permet l'investigation de l'intégralité d'un profil vertical du sol depuis la surface jusqu'à la profondeur considérée (1 – 1.50 m).

La mesure de la teneur en eau peut être effectuée à 3–5 profondeurs selon les cas. Le sol étudié sera comparé à un état de référence déterminé au laboratoire (limite de compression) ou sur le terrain (sol avoisinant non compacté).

Les trois profondeurs importantes à considérer sont: 0.20 – 0.30 m, 0.30 – 0.40 m, et 0.40 – 0.50 m car elles sont décisives dans l'évaluation de la compaction du sol selon cette méthode.

1 Cadre général

1.1 Objectifs

Le principal objectif scientifique de ce travail est l'étude de l'effet de la compaction sur la structure du sol par la mesure de la teneur en eau suite à un apport d'eau en surface effectué par un simulateur de pluie. L'évolution hydrodynamique de la teneur en eau d'un sol à double porosité en réponse à une irrigation artificielle est étudiée.

La méthode proposée peut être appliquée à différentes fins:

- Evaluation d'un sol avant et après des travaux de génie civil.
- Evaluation d'une remise en culture.
- Comparaison entre un sol susceptible d'être atteint et un sol témoin intact.

La connaissance de ces facteurs est primordiale dans le choix de stratégies relatives à l'assainissement des sols compactés ou déstructurés.

Ce manuel rassemble les instructions à suivre pour l'investigation de la compaction du sol tant sur le plan technique que scientifique.

Le plan de ce manuel suit fort logiquement l'énoncé des objectifs et le déroulement chronologique du travail depuis la préparation du matériel jusqu'à l'interprétation des résultats.

1.2 A qui s'adresse ce manuel ?

Ce manuel s'adresse:

- A toutes les autorités chargées de la mise en œuvre de l'ordonnance de la protection du sol contre les atteintes (OSol, 1998).
- A toutes les personnes des milieux de la construction qui doivent apporter la preuve qu'ils n'ont pas porté atteinte au sol lors de leurs activités.
- Aux experts chargés d'évaluer l'état des sols.
- Aux pédologues et aux personnes intéressées au problème de la compaction des sols.

1.3 Organisation et planification

L'organisation et la planification du travail peuvent s'effectuer selon les étapes décrites dans l'organigramme suivant (**Fig. 1**).

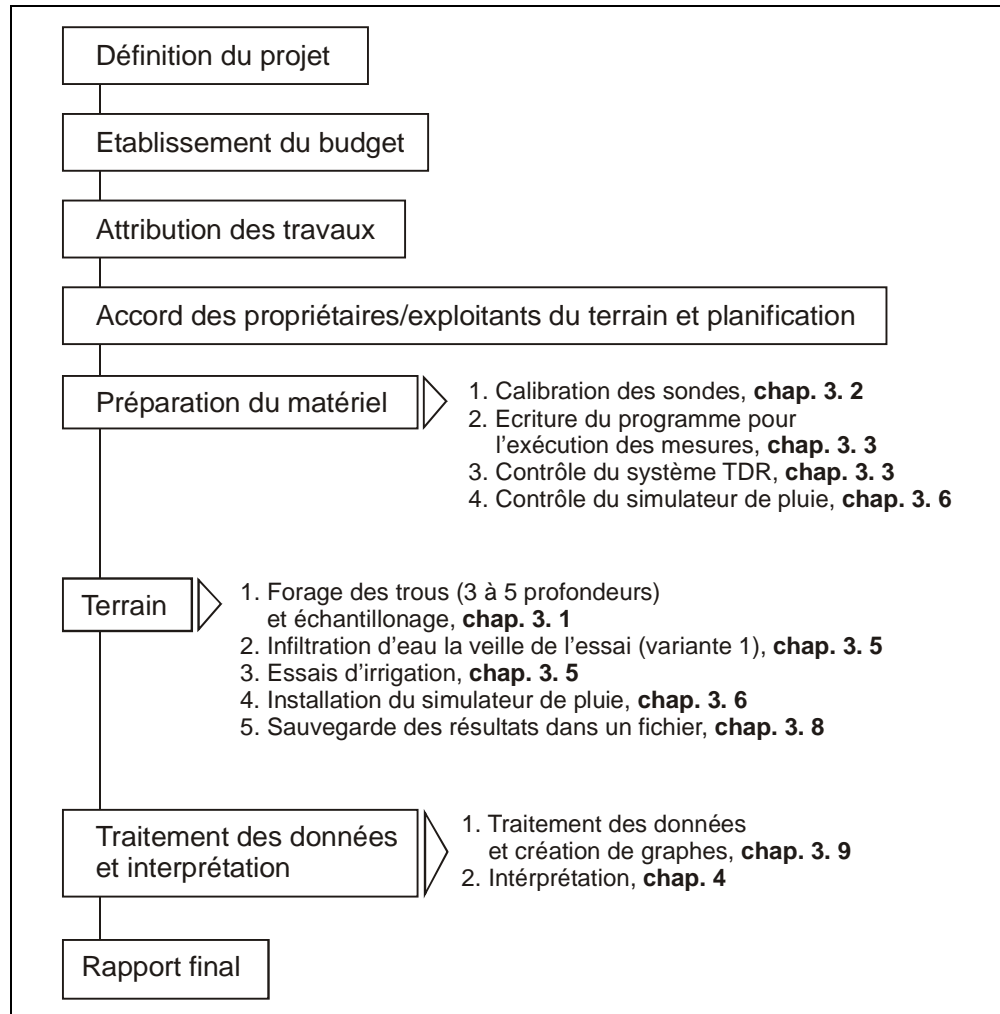


Figure 1: Organisation et planification du travail: principales étapes.

1.4 Points importants

Introduction et objectifs (*obligatoire, pages 9–11*)

Vue d'ensemble: coûts d'investigation (*obligatoire, page 19*).

Technique et mise en oeuvre

- Forage des trous
(obligatoire pour le travail du terrain, *page 21*)
- Calibration des sondes
(pas nécessaire si les sondes de l'université de Berne sont utilisées, *page 22*)
- Mesure de la teneur en eau
(obligatoire, *page 24*)
- Installation du simulateur de pluie
(obligatoire pour le travail du terrain, *page 30*)
- Traitement des données et création de graphes
(obligatoire, *page 35*).

Interprétation des résultats

- Interprétation de base
(obligatoire, *page 37*)
- Analyse détaillée des processus hydrodynamiques
(facultatif, *page 38*)
- Exemples d'application
(facultatif, *pages 39–50*).

2 Vue d'ensemble

2.1 Description des appareils utilisés

2.1.1 La foreuse

Le forage des trous pour l'insertion des sondes TDR doit être effectué par une foreuse à système rotatif pour éviter la perturbation du système. Le diamètre des trous doit être égal à 40 mm. La machine utilisée dans le cadre de ce projet est une machine à chenilles (ROCKY-Raupe), type: P50/M50-BFP 602, Bohrturm type: HRS100, maison: HUMAX.

2.1.2 Le système TDR

Le système TDR est composé d'un *datalogger* (type: CR10X, marque: *Campbell Scientific Inc.*), d'un réflectromètre (type: TDR100, marque: *Campbell Scientific Inc.*), de deux multiplexeurs (type: SDMX50, marque: *Campbell Scientific Inc.*), d'une batterie (12 V) et d'une interface (*optically isolated RS232 interface*, type: SC32A, marque: *Campbell Scientific Inc.*) (**Fig. 2**).

L'ensemble est contenu dans un boîtier isolant. Il permet de mesurer la teneur en eau et la conductivité électrique.

Le principe du fonctionnement du système TDR est illustré dans l'**annexe I**.

Les différents constituants sont décrits brièvement ci-dessous.

- Le TDR100 est un réflectromètre pouvant être contrôlé par un ordinateur et un software *Windows* PCTDR ou par l'instruction 119 par l'intermédiaire du *datalogger* CR10X (ou CR23X). Le software PCTDR est utilisé pour la visualisation de la forme de l'onde (*Waveform*), laquelle est nécessaire pour la configuration du TDR100 et les multiplexeurs (calibration des sondes TDR). Ce software ne permet pas des mesures automatiques. Le TDR100 et les multiplexeurs peuvent être configurés pour le contrôle automatique par l'intermédiaire du *datalogger* (Campbell Scientific, Inc., 2000-2001).
- Le CR10X est un *datalogger* programmable. Les programmes nécessaires à son fonctionnement sont écrits à l'aide du langage de programmation *Edlog* accessible dans le software PC208W. La communication entre le TDR100, le *datalogger* et le multiplexeur est effectuée grâce à un protocole SDM (*synchronous device for measurements*). Un seul *datalogger* peut contrôler plusieurs réflectromètres TDR100 en changeant l'adresse SDM sur le TDR100. Cette adresse doit être entrée dans le premier paramètre de l'instruction 119. La position des *Jumpers* sur les multiplexeurs est ajustée en conséquence (Campbell Scientific, Inc., 2000).
- Un multiplexeur SDMX 50 (utilisation de trois est possible) possède 8 sorties pour les sondes TDR et une sortie coaxial (*COMMON*) pour la connexion au TDR100. Dans le cas de l'utilisation de 3 multiplexeurs, l'adresse SDM sur le TDR100 fixé à 0, *jumpers* sur MSD et LSD seront fixés respectivement en position 0 et 1 pour le premier multiplexeur. Pour le second multiplexeur, les *jumpers* sur MSD et LSD seront fixés respectivement en position 0 et 2.

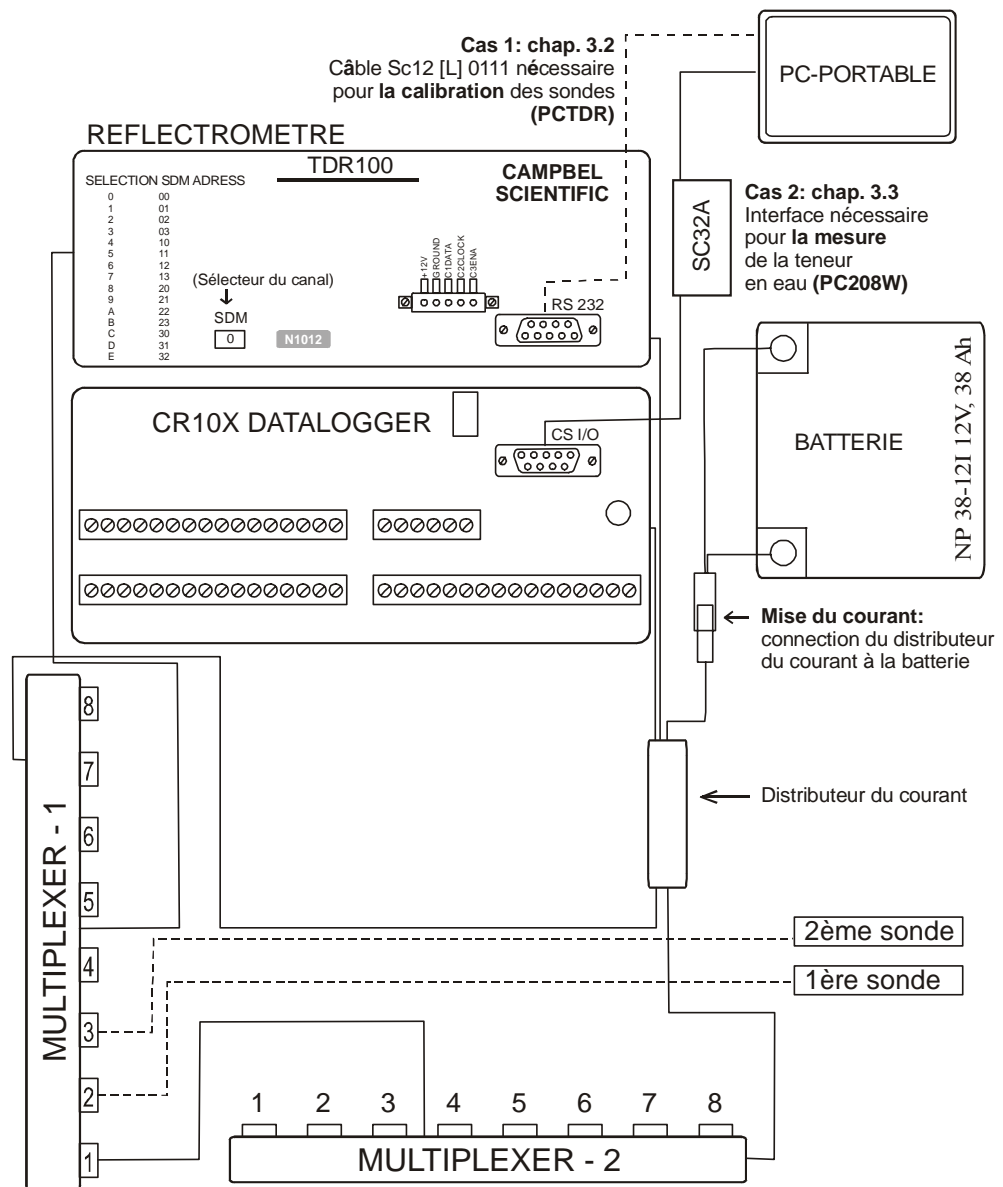
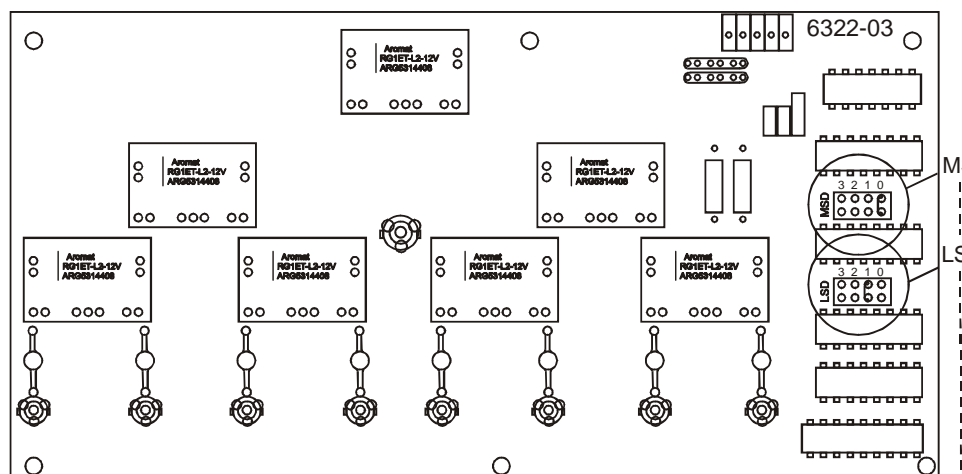


Figure 2: Composantes du système TDR.

Emplacement des Jumpers sur un multiplexeur SDMX50, exemple : 1er multiplexeur

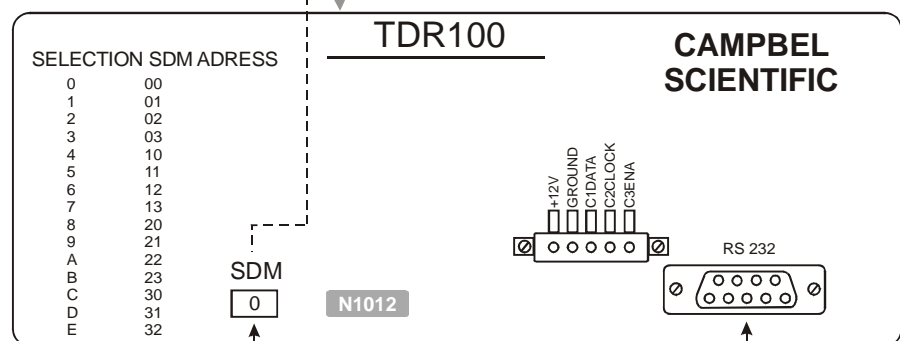


Attribution des adresses SDM (1er multiplexeur)

Adresse Base 4	Instr. 119 First param.1 (Base 4)	TDR100 Switch	1. SDMX50 Jumper Setting		2. SDMX50 Jumper Setting		3. SDMX50 Jumper Setting	
			MSD	LSD	MSD	LSD	MSD	LSD
00	00	0	0	1	0	2	0	3
01	01	1	0	2	0	3	1	0
02	02	2	0	3	1	0	1	1
03	03	3	1	0	1	1	1	2
10	10	4	1	1	1	2	1	3
11	11	5	1	2	1	3	2	0
12	12	6	1	3	2	0	2	1
13	13	7	2	0	2	1	2	2
20	20	8	2	1	2	2	2	3
21	21	9	2	2	2	3	3	0
22	22	A	2	3	3	0	3	1
23	23	B	3	0	3	1	3	2
30	30	C	3	1	3	2	3	3
31	31	D	3	2	3	3	Not available	Not available
32	32	E	3	3	Not available	Not available	Not available	Not available

PC208W

(1er multiplexeur) (2ème multiplexeur) (3ème multiplexeur)



Sélecteur du canal

CALIBRATION (PCTDR)
Connexion directe avec le PC-portable
à l'aide du fil bleu SC12 [L] 0111

Figure 3: Communication entre multiplexeurs et réflectromètre TDR100; attribution des adresses SDM sur le TDR100 en relation avec les positions des MSD et LSD du multiplexeur.

Pour le troisième multiplexeur, les *jumpers* sur MSD et LSD seront fixés respectivement en position 0 et 3 (**Fig. 3**). Le troisième paramètre de l'instruction 119 change en fonction du multiplexeur utilisé.

- Une batterie externe 12V assure l'alimentation de l'appareillage à l'aide d'un distributeur situé au milieu du boîtier.
- Une interface SC32A (*optically isolated RS232 interface*) permet la liaison entre le PC-portable et le *datalogger* pour les mesures.
- Pour la calibration des sondes TDR, un câble bleu SC12[L] 0111 (sans interface) permet la liaison directe entre le TDR100 et le PC-portable.

L'**annexe II** illustre le schéma de raccordement entre les éléments du système TDR.

Pour la configuration et la mesure de θ , deux principaux softwares sont nécessaires: PCTDR utilisé pour la calibration des sondes TDR et PC208W version 3.1 pour la mesure de la teneur en eau proprement dite. Les deux softwares utilisés sont caractérisés comme suit:

- PC208W est le software de support permettant la télécommunication, la programmation du *datalogger*, le transfert des données et les fonctions de leur traitement.
- PCTDR (fourni avec le TDR100) a pour principale fonction, l'affichage de la courbe de θ et de la conductivité électrique.

2.1.3 Les sondes TDR

Pour la mesure de la teneur en eau, des sondes TDR sont nécessaires (**Fig. 4**).

Elles sont composées de deux tiges en chrome-nickel parallèles de 6 mm de diamètre et de 150 mm de longueur, distants de 35 mm. Elles sont fixées sur une plaque métallique à l'aide d'un câble de 180 Ohm lequel est connecté à un transformateur d'impédance (*Transtech* TP103).

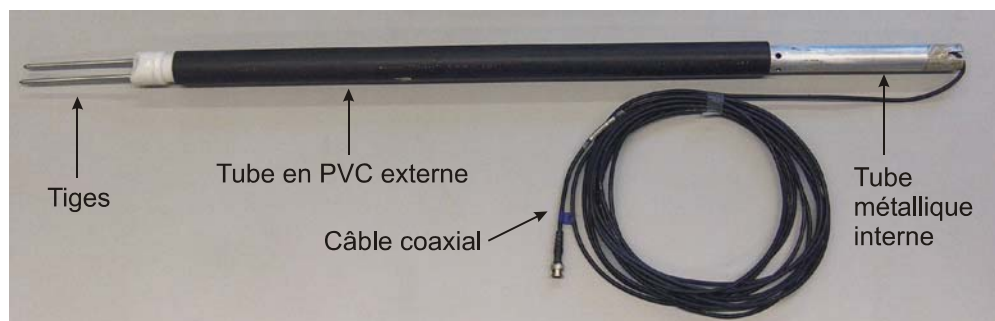


Figure 4: Sonde utilisée pour la mesure de la teneur en eau.

Deux tubes, l'un interne en métal et l'autre externe en PVC, permettent le support des deux tiges et l'insertion de la sonde à différentes profondeurs dans le sol. Insérées dans le sol, les tiges agissent comme guide à l'extension de l'onde au-delà du câble coaxial et permettent sa réflexion, qui dépend du changement de l'impédance.

Les sondes ont été fabriquées à notre demande par *MARKASUB AG* à Olten (Suisse).

2.1.4 Le simulateur de pluie – UNI Berne

Le simulateur de pluie – UNI Berne a été développé à notre demande par M. *Oetliker* de l'Institut *Théodor Kocher* de Berne. Il permet une pluie sous forme de gouttes sur une surface d'un m². 100 tubes de 2 mm de diamètre répartis sur un plateau métallique dont les mouvements latéraux (2 directions) permettent une dispersion de la pluie sur toute la surface du sol même durant les pluies de très faibles intensités. Le simulateur de pluie est équipé d'un débitmètre doté d'une graduation allant de 0.1 l/m à 2 l/m, permettant de régler l'intensité de la pluie. Deux roues facilitent son déplacement sur le terrain. Pour plus de détails, se référer à la section 3. 6. *Installation du simulateur de pluie*.

2.1.5 L'ordinateur portable

Dans cette étude, un PC portable a été utilisé pour les travaux de terrain. Un macintosh peut être également utilisé, vu que les logiciels nécessaires pour la mesure de la teneur en eau sont adaptés pour les deux systèmes. Un minimum de capacité du disque dur (10 GB) et de mémoire (128 MB) suffit pour les mesures et le stockage des données.

2.2 Coûts d'investigation

En considérant que trois points de mesures sont réalisables par jour et que pour chaque expertise, trois points de mesures sont nécessaires, il faut compter un coût total de Frs. 5'000.--. Soit Frs. 1'500.-- par point de mesure.

Ces coûts peuvent être sujets à des réajustements selon certains facteurs tels que:

- Le but défini / le problème à résoudre impliquant le nombre de points de mesure nécessaires (étude ponctuelle ou étude de la variabilité spatiale).
- L'éloignement du site.
- L'entente avec le propriétaire du terrain / rémunération.
- La qualité des résultats / interprétation.

2.3 Limites d'application

La méthode proposée peut être appliquée dans tous les types de sol et sous toutes les conditions. Par ailleurs, certaines restrictions sont à observer lors des travaux du terrain.

- Un milieu caillouteux rend l'introduction des sondes délicate et peut causer un mauvais fonctionnement de celles-ci. Dans ce cas, il est recommandé d'introduire plus de sondes possibles (5 par exemple) pour assurer le bon fonctionnement de certaines d'entre elles. Dans des conditions plus extrêmes (présence élevée de cailloux), procéder à l'excavation d'une fosse et introduire des sondes horizontalement à partir d'une des parois; ceci permettra de mieux installer les sondes et de changer leurs positions si elles sont en contact avec des cailloux.
- Dans un sol très sec, le forage est difficile à exécuter. Il est conseillé de mouiller le sol la veille de la campagne de forage. Ceci est valable également pour les essais d'irrigation.
- Dans des conditions de pluie intense, il est recommandé de reporter les essais d'irrigation. Le sol ne doit pas être gelé ni entièrement saturé. Sur le terrain, il est recommandé de couvrir le sol afin d'éviter des précipitations éventuelles (saisons de printemps ou d'automne).

2.4 Prescriptions de sécurité

Pour toute manipulation concernant les composantes du système TDR contenues dans le boîtier (**Fig. 2**), déconnecter la batterie du distributeur du courant. Ne pas toucher les composantes du système TDR pendant son fonctionnement (mesures).

2.5 Où se procurer les appareils de mesure ?

Le dispositif de mesure est constitué d'un ensemble d'appareils nécessaires pour l'obtention des mesures de teneurs en eau θ depuis le forage des trous d'accès des sondes TDR jusqu'à l'acquisition des valeurs finales de θ . Le **tableau 1** indique où trouver des appareils de mesure.

Tableau 1: Emplacement des appareils de mesure.

Appareil	Utilité	Emplacement
La foreuse HUMAX	Forage de trous d'accès des sondes TDR	Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL/FNP) Birmensdorf
Le système TDR	Mesure de la teneur en eau	Section des sols, institut de géographie, UNI Berne
Les sondes TDR	Mesure de la teneur en eau	Section des sols, institut de géographie, UNI Berne
Le simulateur de pluie	Irrigation	Section des sols, institut de géographie, UNI Berne
Un ordinateur portable	Acquisition, stockage et traitement des données	Section des sols, institut de géographie, UNI Berne

3 Technique et mise en oeuvre

3.1 Forage diagonal des trous pour l'insertion des sondes TDR

Le forage des trous doit être exécuté selon un angle diagonal de 45° (**Fig. 5**).



Figure 5: Forage diagonal des trous d'accès pour les sondes.

3.1.1 Procédure

- Si le sol est très sec, verser 20 à 40 litres d'eau sur la surface du sol à forer, la veille de la campagne de forage.
- Eviter de marcher sur le sol à investiguer pour éviter toute compaction.
- Forer selon un angle de 45°. Les forages doivent être alignés, proches les uns des autres et ne doivent pas dépasser 1 m (interdistance maximum) afin qu'ils soient irrigués par le simulateur de pluie qui arrose une surface d'1 m². 3 à 5 profondeurs sont à exécuter selon les cas (dans le cas de 3 profondeurs, choisir: 0.20 – 0.30 m, 0.30 – 0.40 m et 0.40 – 0.50 m; dans le cas de 5 profondeurs, choisir par exemple: 0.10 – 0.20 m, 0.20 – 0.30 m, 0.30 – 0.40 m, 0.40 – 0.50 m et 0.50 – 0.60 m).
- Après chaque forage, insérer un tube en PVC de même diamètre (4 cm) et de même longueur pour maintenir la stabilité des trous (**Fig. 6**).

Les profondeurs citées ci-dessus sont considérées selon la verticale. Pour le forage des trous, ces distances sont à convertir en distances obliques correspondantes.



Figure 6: Mise en place des tubes provisoires en PVC pour maintenir la stabilité des parois des trous; exemple de 5 profondeurs; A) insertion du tube, B) tubes insérés en une rangée ne dépassant pas 1 mètre.

3.2 Calibration des sondes TDR – programme PCTDR

1. Régler le sélecteur du canal SDM sur le réflectromètre TDR100 (**Fig. 3**). Localiser d'abord la position du *Jumper* sur MSD et sur LSD du multiplexeur. Trouver l'équivalent de cette combinaison (MSD, LSD) sur TDR *Switch* (tableau des attributions des adresses) (**Fig. 3**). Entrer ce chiffre dans la fenêtre SDM du TDR100 du système TDR. Exemple: si les *Jumpers* sont en position 0 sur MSD et 1 sur LSD, l'équivalent sur TDR100 sera 0 (**Fig. 3**).
2. Connectez le PC-portable directement au port RS232 du TDR100 avec le câble bleu SC12 [L] 0111.
3. Mettre le courant: connecter la fiche de la batterie à celle du distributeur du courant.
4. Verser de l'eau dans un récipient en verre. Immerger les tiges de la sonde dans l'eau.
5. Connecter la sonde au canal 2 du premier *Multiplexer* (le canal 1 est déjà connecté au second *Multiplexer*).
6. Pressez deux fois sur le répertoire du software PCTDR (le menu principal apparaît, **Fig. 7**).
7. Aller dans la fenêtre **Settings** puis définissez les options suivantes:
 - a) *Communication Settings*: fixez *Com Port* sur COM1 et *Baud Rate* sur 57.6, puis confirmez avec **√ Ok**.
 - b) *Waveform Selection*: activez *Reflection Waveform*, puis confirmez avec: **√ Ok**.

- c) *Multiplexer*: s'il y'a déjà le multiplexeur 1, attacher une sonde au canal 2 avec *AttachProbe*, appuyer sur **OK**. Le canal 1 doit être libre car il est attaché au second multiplexeur.
- d) *Calibration Functions*: choisir *Volumetric Water Content*, sélectionnez par exemple la calibration selon Topp, puis confirmez avec **√ Ok**.
- e) Ajuster les valeurs de:

Cable:

V_p : 1.00 [$V_p = V_p(\text{actuel du milieu donné}) / V_p(\text{vacuum})$]: vitesse relative de propagation dans le câble, non déterminant dans le calcul de θ , avec $V_p(\text{vacuum}) = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Waveform:

Average: 100 (moyenne du nombre de mesures sur laquelle est calculé un point de la courbe à une distance donnée par rapport au TDR100); une valeur élevée est utilisée s'il y'a bruit de fond.

Points: 256 (nombre de points constituant la courbe *Waveform*)

Start: 0 (à modifier pour que la courbe apparaisse en entier sur l'écran; **Fig. 7**).

Length: Valeur dépendant de la longueur des tiges de la sonde TDR. Elle est de 3 pour des tiges d'une longueur $0.10 \text{ m} < L < 0.20 \text{ m}$.

Probe:

Length: 0.14 (longueur réelle des tiges).

Offset: 0.015 (longueur de la partie des tiges qui reste en dehors du sol, à ajuster).

- f) Une fois ces valeurs entrées, appuyez sur le bouton **▲** – *Next Probe* sous *Multiplexer*, l'option *MuxAddr: ?-?-?* devient *MuxAddr: 2*.
- g) Appuyer sur **GetWaveform**
- h) Attendre quelques secondes.
- i) Appuyer sur **Water Content**

La valeur de la teneur en eau doit être égale à (ou proche de) $1.00 \text{ (m}^3 \text{ m}^{-3})$ ce qui signifie une teneur en eau de 100 %. Si cette valeur n'est pas atteinte, veuillez changer la valeur de *Length* dans l'option *Waveform* et éventuellement la valeur de *Offset* dans l'option *Probe*.

- j) Pour visualiser la courbe entière dans la fenêtre d'affichage, appuyer sur la fenêtre **Adjust Axes Range**, la fenêtre *Vertical Axis* apparaît, veuillez alors ajuster les valeurs de *Max* et *Min* respectivement pour l'axe y et ceux de l'axe x, puis pressez **√ ok**.

On peut, dans le cas échéant, sauver la configuration de la calibration avec *Save Configuration* dans la fenêtre **File**. Pour faire appel à cette configuration pour d'autres calibrations, par exemple, on utilise *Load Configuration* sous la fenêtre **File**.

En cas d'erreur, quittez l'application, puis redémarrer-la à nouveau en appuyant deux fois sur le software PCTDR.

Les valeurs obtenues sont à affiner par la calibration selon Roth (software PC208W) avant d'être introduites dans l'instruction 119 du programme d'exécution pour la mesure de la teneur en eau (voir section 3.3).

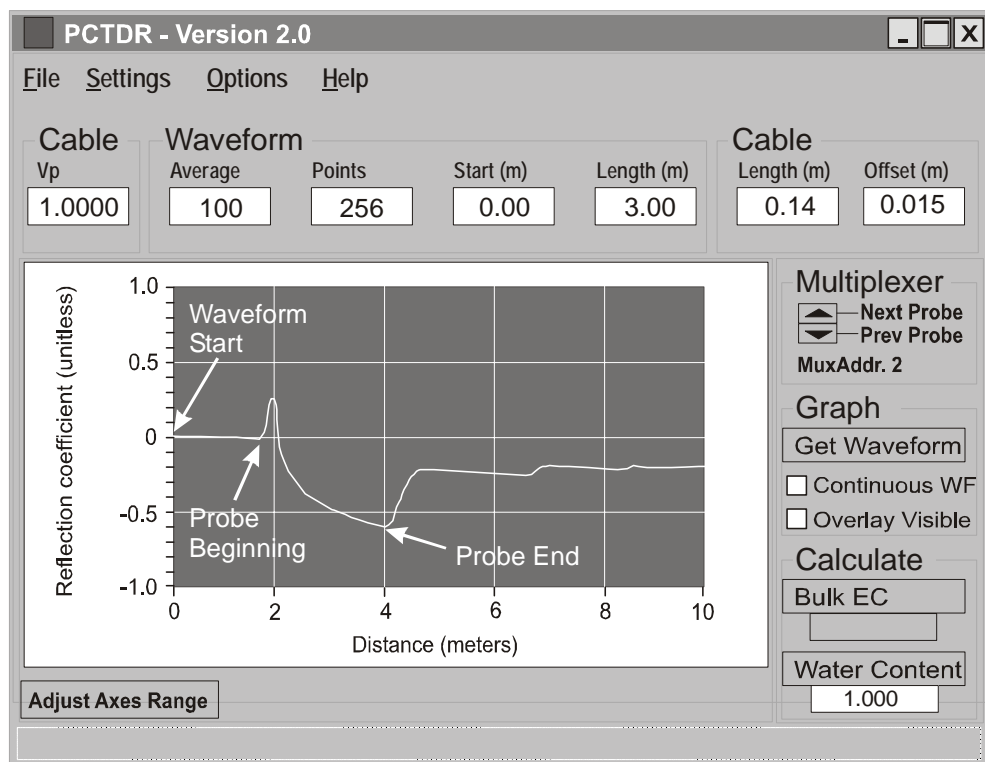


Figure 7: Menu principal du programme PCTDR pour la calibration des sondes TDR (Campbell Scientific, Inc., 2000–2001).

3.3 Mesure de la teneur en eau – Programme PC208W 3.1

Cette partie précède l'essai d'irrigation car la mesure de θ doit être faite environ un quart d'heure avant l'irrigation pour estimer les conditions initiales du sol. Pour effectuer des mesures de θ , suivez les instructions ci-dessous:

1. Connecter le *datalogger* CR10X avec le PC-portable par l'intermédiaire de l'interface SC32A (*optically isolated RS232 Interface*) (cf. **Fig. 2**, page 16).
2. Allumez le PC-portable.
3. Connectez la sonde au canal 2 du premier Multiplexeur (le canal 1 est déjà connecté au second Multiplexeur) (cf. **Fig. 2**).

4. Mettez le courant: connectez la fiche de la batterie à celle du distributeur du courant (cf. **Fig 2**).
5. Régler le sélecteur du canal du SDM du TDR100 sur 0 (cf. **Fig. 2**).
6. Pressez deux fois sur le répertoire RC208W 3.1 (visible sur l'écran du PC-portable); le menu principal illustré dans la **figure 8** apparaît.

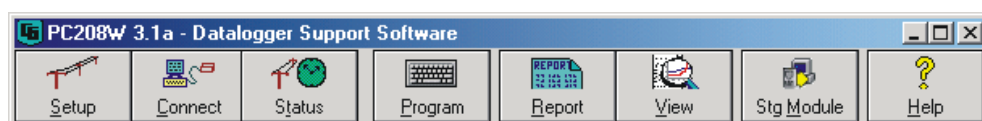


Figure 8: Menu principal du programme PC208W (Campbell Scientific, Inc., 2000–2001).

- a) Pressez sur *Setup*: le menu de configuration illustré dans la **figure 9** apparaît. Si la fenêtre *Device Map* est vide; pressez sur Add COM Port, COM1 apparaît dans la fenêtre *Device Map*; pressez ensuite sur Add Device pour y connecter un *Datalogger CR10X1*. Les autres options (*Collect*, *File Mode* et *File Format*) doivent être similaires à celles de la **figure 9**. Une fois configurée, quittez cette fenêtre.

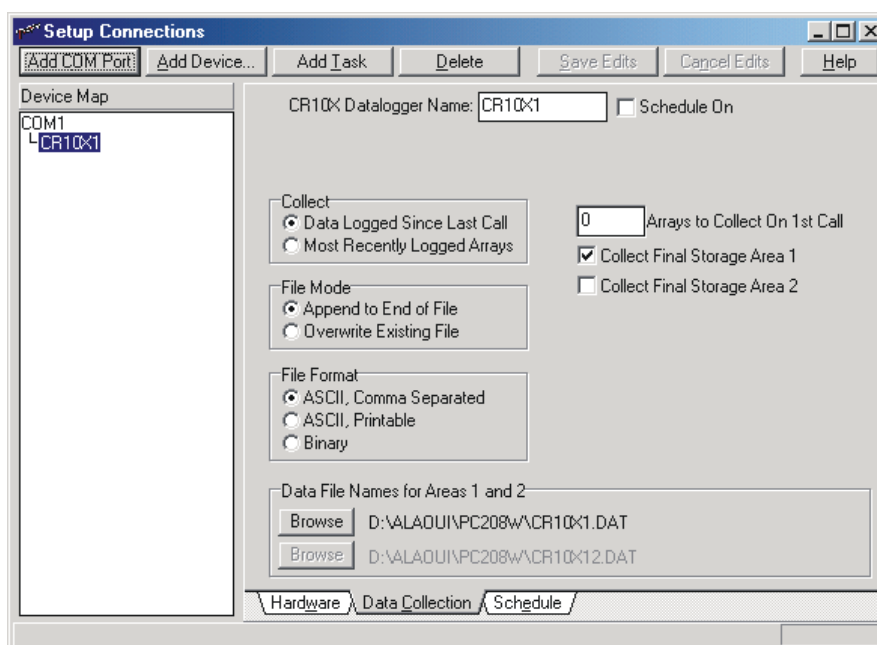


Figure 9: Menu de configuration de la communication entre le *datalogger* et le PC-portable (Campbell Scientific, Inc., 2000–2001).

- b) Pressez sur *connect*: le menu de connexion illustré dans la **figure 10** apparaît. Pressez ensuite sur Associate DLD Program. Choisir un programme *.DLD existant déjà dans votre répertoire, confirmez avec OK, puis appuyer sur send. Si le message *CAUTION* apparaît, confirmez avec OK. Le message *Select DLD program for CR10X1* apparaît, confirmez de nouveau avec OK. Quand le transfert du fichier est achevé, le message suivant apparaît: *Successfull Transfer*, appuyer sur ok pour que les mesures commencent.

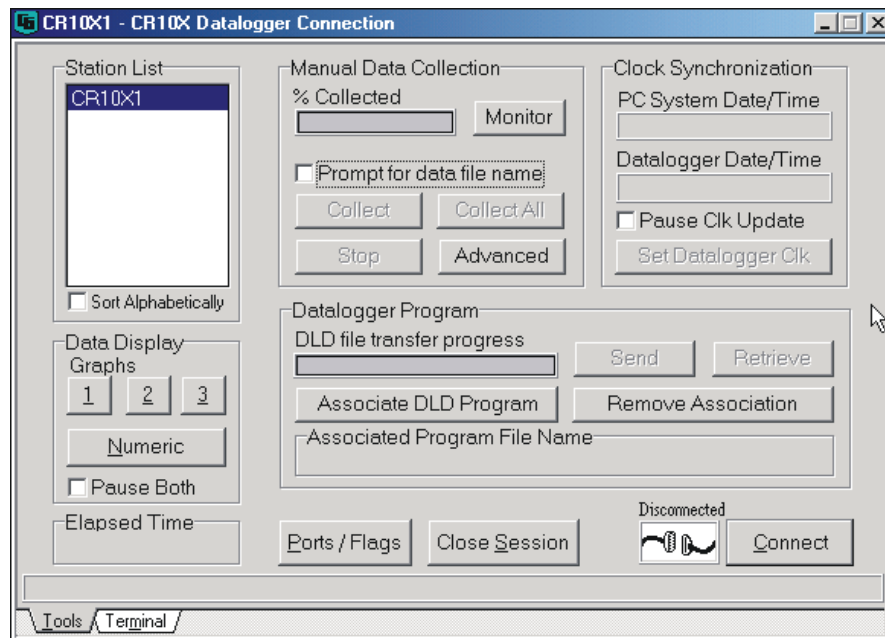


Figure 10: Menu de connexion (Campbell Scientific, Inc., 2000–2001).

7. Pour écrire un nouveau programme:
 - a) Appuyer deux fois sur *P*rogram du menu principal (**Fig. 8**), puis appuyez sur *F*ile, *N*ew puis sélectionnez CR10X et ensuite confirmez avec √Ok].
 - b) Mettre le curseur sur une ligne vierge du programme, puis insérer une instruction en appuyant sur le bouton droit de la souris.
 - c) Sélectionner l’instruction désirée.
 - d) Ecrire toutes les instructions en suivant le programme illustré dans l’**annexe I**.
 - e) Changer l’intervalle de temps si nécessaire
 - f) Pressez sur la fenêtre principale File: Pressez sur *s*ave; le message de confirmation: *compile program* apparaît
 - g) Pressez sur yes; le message *No errors detected* apparaît,

- h) Pressez sur pour lancer le commencement des mesures.
 - i) Si une erreur est détectée, vérifier toutes les instructions du programme.
 - j) Fermez le programme par l'icône en haut à droite .
 - k) Recommencez la procédure décrite dans la section 6.b du paragraphe 3.3 depuis jusqu'à l'apparition du message: *Successful Transfer*, appuyer sur pour commencer les mesures.
8. Collection des données:
- a) Appuyer sur *collect* de la **figure 10**; la fenêtre: *Alternate Data Filename* apparaît.
 - b) Appuyez sur *Browse*
 - c) Sélectionnez un fichier vierge où vous voulez stocker vos résultats ou créez-en un en tapant un nom nouveau qui n'existe pas encore, exemple (test.DAT).
 - d) Confirmez avec .
 - e) Pour la signification des valeurs contenues dans le fichier des résultats, se référer au paragraphe 3. 9.
9. Pour consulter les données enregistrées:
- a) Appuyez sur *View* (**Fig. 8**); dans la barre principale du menu, appuyez sur *File* puis sur *Open*, sélectionnez le fichier où vous aviez stocké les résultats. Si le message: *No FSL file selected for ...* apparaît, cochez l'option: *I do not an FSL file for this data*, puis confirmez avec .
 - b) Pour quitter, appuyez sur le bouton en haut à droite de cette fenêtre.

3.4 Essais d'irrigation

3.4.1 Insertion des sondes

1. Si le sol est très sec, versez 1 litre d'eau à l'intérieur du tube en PVC pour faciliter l'enfouissement des tiges dans le sol (**Fig. 12**).
2. Marquez la longueur du tube, utilisé pour la stabilisation du trou, au niveau du sol (A) puis retirez-le totalement (B) avant d'insérer la sonde TDR.
3. Indiquez la même longueur sur la sonde TDR à l'aide d'un stylo indélébile (A*) puis insérez-la jusqu'au fond du trou (C).
4. Plantez d'abord le tube métallique interne de la sonde à l'aide d'un marteau en caoutchouc. Les tiges pénètrent alors dans le sol; faites attention à la présence de pierres ou d'obstacles qui pourraient les endommager.
5. Enfilez un tube en PVC au sommet du tube en métal et frappez le tube en PVC à l'aide du marteau pour le faire coulisser vers le fond du trou.
6. Répétez la procédure 4, puis 5 jusqu'à ce que les tiges soient complètement insérées dans le sol (le niveau marqué sur le tube en PVC externe doit coïncider avec la surface du sol).

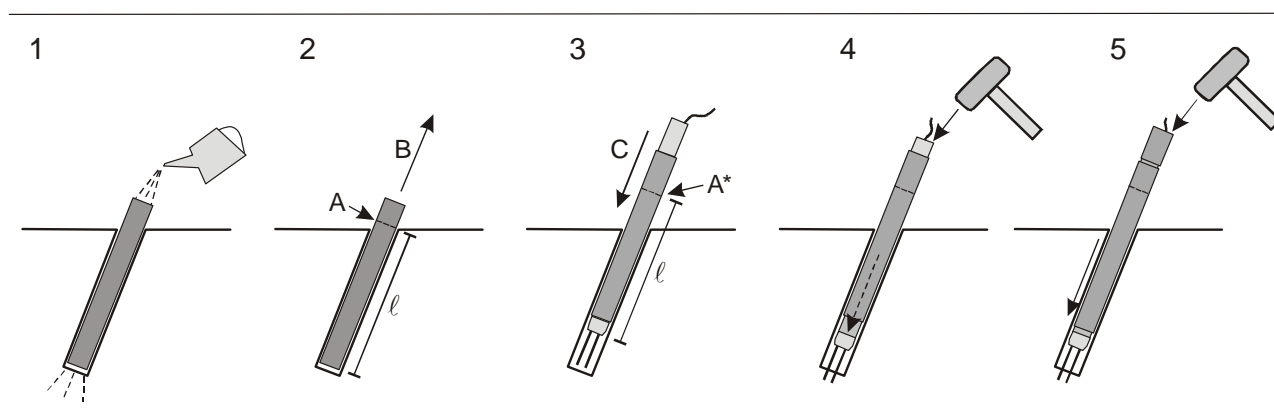


Figure 12: Schéma d'installation des sondes TDR; 1-2: tube en PVC installé pour stabiliser le trou, 3-5: installation de la sonde TDR.

3.5 Disposition des appareils de mesure avant l'irrigation

Le simulateur de pluie doit irriguer le sol dans lequel les sondes ont été insérées. Dans la figure ci-dessous, le simulateur de pluie va être d'abord en état de fonctionnement (réglage du débit, etc.) avant d'être tiré à droite vers les sondes (**Fig. 11**).



Figure 11: Dispositif de mesure: A) simulateur de pluie, B) système TDR, C) sondes TDR insérées obliquement selon un angle de 45°.

3.5.1 Humidité du sol et irrigation

- Si le sol est très humide, attendre 2 à 3 jours sans pluie avant les irrigations.
- Si le sol est très sec à moyennement sec, avant chaque irrigation, verser doucement et lentement 20 à 40 litres d'eau selon l'état initial du sol sur la surface de chaque point de mesure la veille de l'essai.
- Avant l'irrigation, boucher l'espace vide autour des sondes avec de la bentonite. Procéder doucement en secouant les sondes (au niveau supérieur du tube en PVC noir supportant la sonde) pour permettre à la bentonite de pénétrer dans l'espace vide autour de la sonde. La bentonite doit pénétrer jusqu'à une profondeur d'environ 20 à 30 cm. Cette procédure est importante pour empêcher le flux préférentiel autour des sondes.
- L'intensité de la pluie doit être comprise entre 0.5 l/min (30 mm/h) et 0.7 l/min (42 mm/h) selon le type de sol et selon son état initial.
- Avant chaque essai, mesurer la teneur en eau un quart d'heure avant l'irrigation.

3.5.2 Nombre d'essais par point de mesure

Deux variantes sont à considérer quant au nombre d'essais d'irrigation à effectuer sur un point de mesure:

1. Un seul essai d'irrigation. Dans ce cas, il est impératif de mouiller le sol, la veille de l'essai avec 30 à 50 litres d'eau selon son état initial. Dans ce cas, la mesure de θ sera effectuée 15 minutes avant le début de l'irrigation, pour évaluer l'état initial du sol, pendant l'irrigation (1 heure) et le drainage (1 heure). La teneur en eau sera alors mesurée sur une durée totale de 2 h 15 mn.
2. Une autre solution consiste à effectuer une série de 3 irrigations successives. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de mouiller le sol la veille des essais. Les essais se dérouleront comme suit:
 - Un premier essai d'une durée d'1 heure, suivi d'une période d'une heure sans apport d'eau (drainage).
 - Un deuxième essai d'une durée d'1 heure, suivi d'une période d'une heure sans apport d'eau (drainage).
 - Un troisième essai d'une durée d'1 heure, suivi d'une période d'une heure sans apport d'eau (drainage).

Dans ce cas, la mesure de θ sera également effectuée 15 minutes avant le début de l'irrigation, pour évaluer l'état initial du sol, et se prolongera ensuite sur une durée de 6 heures. La durée totale des mesures sera alors de 6 h 15 mn. Cette solution est proposée dans le cas de l'éloignement du site à investiguer et évitera des déplacements supplémentaires sur le terrain.

3.6 Installation du simulateur de pluie – UNI Berne

Les composantes du simulateur de pluie sont illustrées dans la **figure 13**. Notez que les tuyaux sont indiqués en foncé et les plaques métalliques en blanc. Suivez les instructions pour l'installation.

3.6.1 Avant d'aller sur le terrain

1. Bien nettoyer l'intérieur des tuyaux de distribution (11) s'ils contiennent des impuretés.
2. Remplacer les tuyaux défectueux.
3. Préparer un tissu propre pour protéger la pompe (2) au niveau de l'arrivée d'eau.
4. Nettoyer le filtre (3).
5. Mettre, si nécessaire, de la graisse aux endroits permettant le mouvement horizontal de la partie mobile, en contact avec la plaque métallique (18).

3.6.2 Sur le terrain

Coupez l'herbe de la surface à irriguer; ne pas marcher sur le sol pour éviter toute compaction.

Pour l'installation du simulateur de pluie – UNI Berne, suivez les instructions ci-dessous et reportez-vous à la **figure 13**.

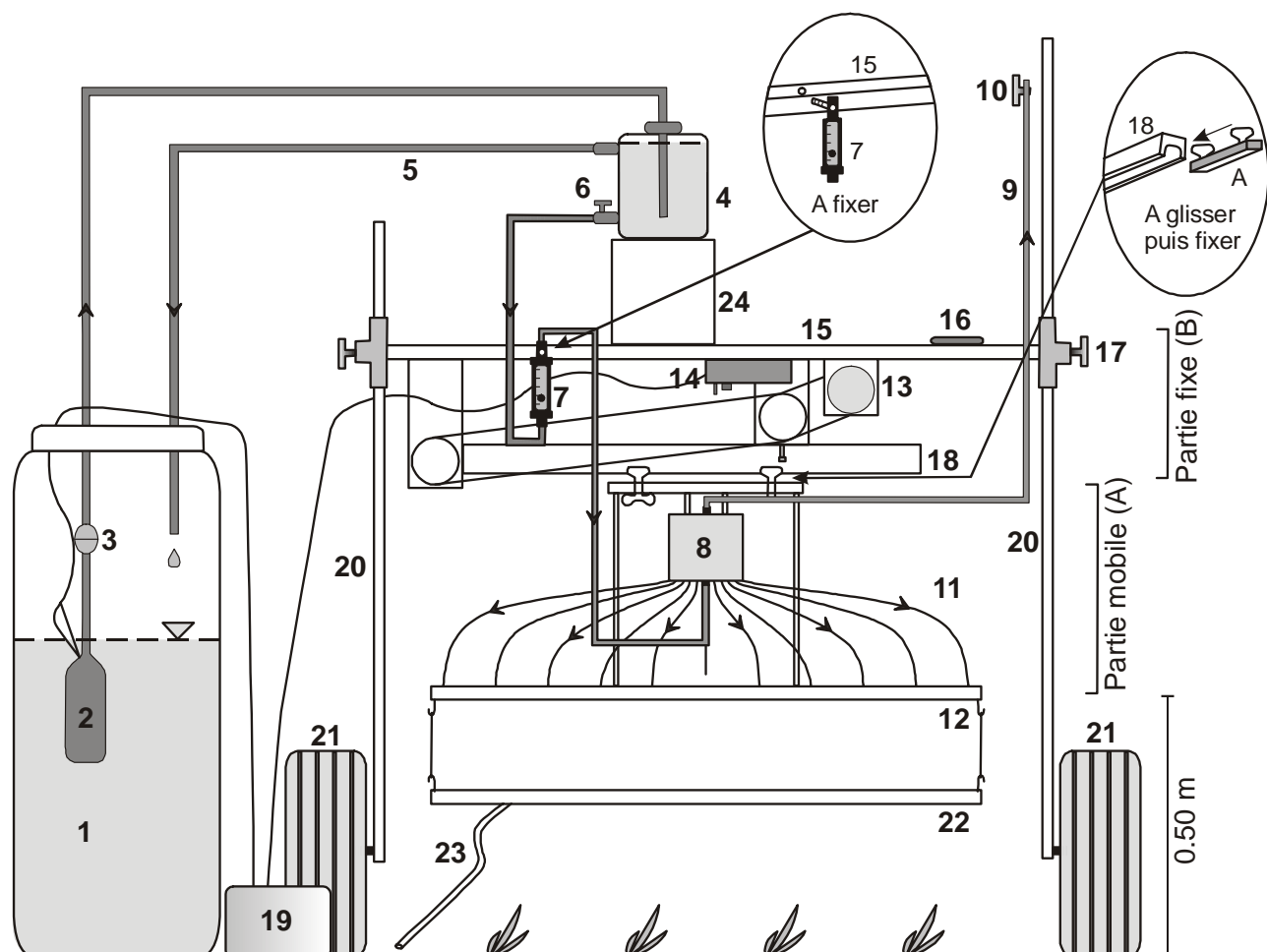
1. Fixez la partie mobile (A) à la partie fixe (B): glissez les deux vis de la barre métallique de la partie mobile dans la fente se trouvant sous la barre métallique (18) puis serrez les vis.
2. Fixez le débitmètre (7) à la barre métallique (15).
3. Posez le récipient (4) sur le support (24).
4. Fixez la plaque métallique d'évacuation d'eau (22) à celle de distribution (12). Mettez le tuyau d'évacuation (23) hors de la surface du sol à investiguer, ainsi, l'eau évacuée pendant le réglage ne s'infiltre pas dans le sol considéré.
5. Réglez bien le niveau (16): atteindre un niveau horizontal parfait.
6. Si l'eau (1) à pomper est trouble, filtrez-la à l'aide d'une passoire ou d'un tissu fin avant de la verser dans le grand bidon.
7. Si nécessaire, couvrez la pompe par un tissu fin et propre.
8. Mettez la pompe sous tension: connectez la pompe (2) à la batterie (19) grâce au fil électrique.
9. Attendez que le récipient (4) soit rempli jusqu'au niveau du trop-plein (5), puis ouvrez la vanne (6) au maximum.
10. Chassez l'air contenu dans les tuyaux (6)–(7) puis dans le tuyau (7)–(8) selon la **figure 14**.
11. Ouvrez la vanne de purge (10) et aspirez l'air fortement pendant quelques secondes, fermez-la. Attendez quelques secondes puis recommencez, 4 à 5 fois, jusqu'à ce que tout l'air contenu dans le plexiglas (8) et dans le tuyau (9) soit chassé. Fermez ensuite la vanne (10).
12. Fermez doucement la vanne (6) du récipient (4) jusqu'à ce que la bille flottante du débitmètre (7) indique le débit souhaité (la base de la bille indique la graduation correspondante).
13. Fixez la vanne (10) à un niveau plus haut sur le pied d'appui (20) avec une ficelle. S'il y a entrée d'air, celui-ci restera piégé en haut du tuyau et ne pénétrera pas dans le cylindre (8).
14. Enlevez la plaque métallique d'évacuation (22) sans verser l'eau sur la surface du sol à investiguer.
15. Connectez le régulateur de vitesse du mouvement (14) à la batterie (19).
16. Notez l'heure exacte du commencement de l'irrigation.

17. A la fin de l'irrigation, déconnectez le régleur de vitesse du mouvement (14) de la batterie (19). Déconnectez également la pompe (2) de la batterie (19).
18. Fermez le robinet (6).
19. Mettez la plaque métallique (22) par terre, sur la surface du sol investigué, afin de récolter les dernières gouttes; évacuez cette eau récoltée loin du point de mesure à l'aide du tuyau d'évacuation (23).

3.6.3 En cas de dysfonctionnement

L'entrée d'air dans le cylindre en plexiglas (8) provoque un changement dans le débit imposé et par conséquent, le dysfonctionnement du simulateur de pluie. Quelques conseils sont à considérer pour remédier à ce problème:

1. Réglez le niveau (16) pour atteindre une horizontalité parfaite du simulateur de pluie.
2. Nettoyez ou remplacez le tissu qui protège la pompe (2).
3. Secouez la pompe (2) pour chasser l'air qui s'y trouve piégé.
4. Nettoyez le filtre (3) de temps à autre.
5. Nettoyez les tuyaux de distribution (11).
6. Les extrémités des tuyaux de distribution (11) sont parfois abîmées au contact de la plaque métallique (12); coupez la partie abîmée et fixez le bout intact du tuyau (11) à la plaque métallique (12).
7. Vérifiez tous les contacts entre les tuyaux et les supports auxquels ils sont attachés (exemple: contact au niveau du cylindre (8), tuyau d'en haut (9) et celui d'en bas (7)).
8. Après ces contrôles, reprenez la manœuvre depuis le point 10 jusqu'au point 19 de la *section 3. 6. 2.* pour faire fonctionner à nouveau le simulateur de pluie.



Légende:

- | | | | |
|----|-----------------------------------|----|---|
| 1 | Réservoir d'eau | 13 | Moteur 12V |
| 2 | Pompe | 14 | Régleur de vitesse du mouvement |
| 3 | Filtre | 15 | Barre métallique supérieure |
| 4 | Récipient | 16 | Niveau |
| 5 | Tuyau de trop-plein | 17 | Régleur du niveau |
| 6 | Vanne de régulation du débit | 18 | Plaque métallique permettant le mouvement |
| 7 | Débitmètre à bille mobile | 19 | Batterie |
| 8 | Cylindre en plexiglas | 20 | Pied d'appui |
| 9 | Tuyau de purge | 21 | Roues |
| 10 | Vanne de purge | 22 | Plaque métallique d'évacuation d'eau |
| 11 | Tuyaux de distribution | 23 | Tuyau d'évacuation |
| 12 | Plaque métallique de distribution | 24 | Support |

Figure 13: Composantes et installation du simulateur de pluie – UNI Berne.

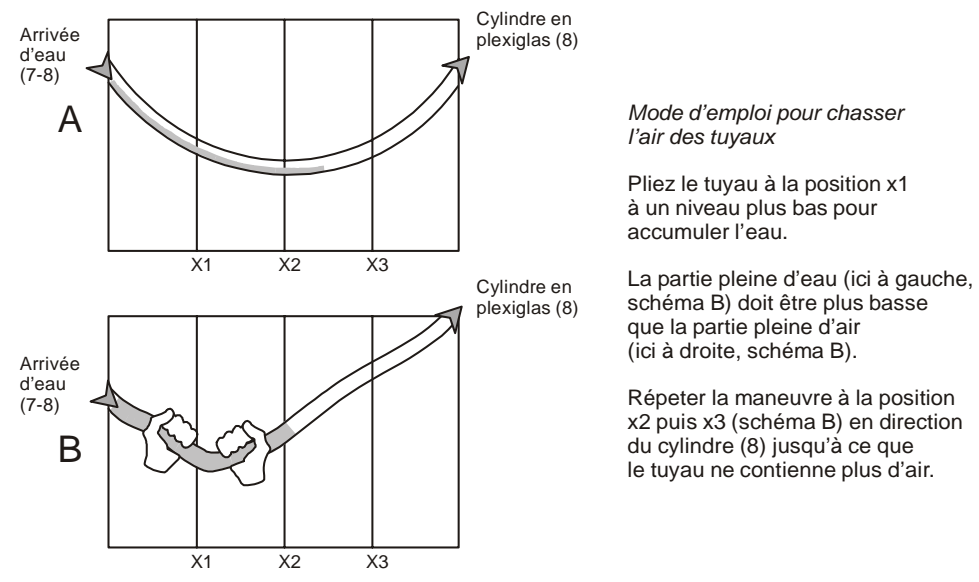


Figure 14: Evacuation de l'air contenu dans les tuyaux.

3.7 Visualisation de la courbe de la teneur en eau

Le programme PC208W permet de visualiser instantanément l'évolution de la teneur en eau θ lors de sa mesure sur le terrain. Suivez les instructions ci-dessous pour cette visualisation:

1. Dans le menu principal (**Fig. 10**), pressez sur **1** sous *Data Display / Graphs*. Le graphe apparaît (**Fig. 15**).
2. Pressez sur **Setup** en bas de cette fenêtre pour le réglage des axes x et y (dimensionnement de l'affichage) et la sélection des paramètres à visualiser. Pour visualiser une seule courbe, sélectionnez le premier paramètre sous *Input locations*, puis appuyer sur **ok**.
Notez que dans l'option axes des x, le réglage de la durée d'affichage (*Graph Width*) permet l'affichage complet de la courbe durant 9 heures (durée maximale).

Notez que cette visualisation est relative aux valeurs finales de la teneur en eau en m^3/m^3 obtenues selon la formule de Roth et al. (1990) (**annexe I**).

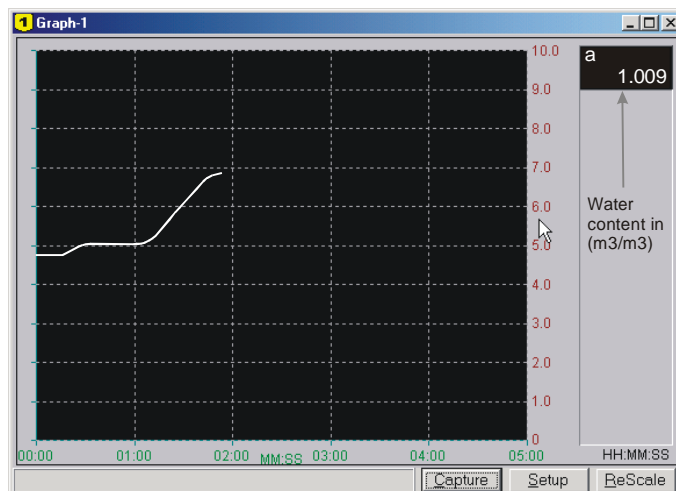


Figure 15: Menu pour la visualisation de la courbe de la teneur en eau (Campbell Scientific, Inc.).

3.8 Sauvegarde des résultats dans un fichier

1. Pressez deux fois sur le répertoire PC208W 3.1, le menu principal apparaît (**Fig. 8**). Pressez sur Connect.
2. Dans la fenêtre *Datalogger Connection* (**Fig. 10**), pressez sur Collect, le menu *Alternate Data Filename* apparaît.
3. Pressez sur *Browse*, choisir un répertoire où vous voulez sauvegarder les données; puis créez un nouveau fichier avec l'extension *.dat (exemple test.dat) puis pressez sur Ok. Si un message apparaît, cochez l'option *I do not want an FSL file for this data file*. La fenêtre % Collected montre l'état d'avancement de la sauvegarde.

3.9 Traitement des données et création de graphes

Pour traiter les données, importez le fichier, où vous aviez stocké les résultats (exemple: test.dat), dans *Excel*, *Axum* ou dans un autre programme graphique. Notez que le fichier exporté sera composé de plusieurs colonnes. Dans le cas de l'utilisation d'une seule sonde TDR; cinq colonnes sont engendrées par le programme écrit en *edlog* (voir **annexe I**):

1. Code relatif à la mesure TDR.
2. Colonne représentant le nième jour depuis le 1^{er} janvier (le 5 février sera le 36^{ème} jour).
3. Heure et minutes HHMM.
4. Le temps en secondes.
5. La teneur en eau en m³.

4 Interprétation des résultats

4.1 Interprétation de base

4.1.1 Principales classes

Pour l'évaluation de la compaction du sol, deux types majeurs de réaction en réponse à une irrigation peuvent être distincts (**Fig. 16**):

1. L'eau stagne en surface et ne s'infiltre pas en profondeur. Dans ce cas, la teneur en eau mesurée le long du profil, n'accuse aucune augmentation en profondeur. Cette absence de réaction indique un sol très compacté.
2. L'eau s'infiltre rapidement en profondeur et la teneur en eau mesurée le long du profil vertical, montre une augmentation significative. L'augmentation de θ est observée jusqu'à une profondeur de 0.80 – 0.90 m. Dans ce cas, on peut parler de sol non compacté.

Le cas de Frauenfeld illustre bien ces deux types de réaction.

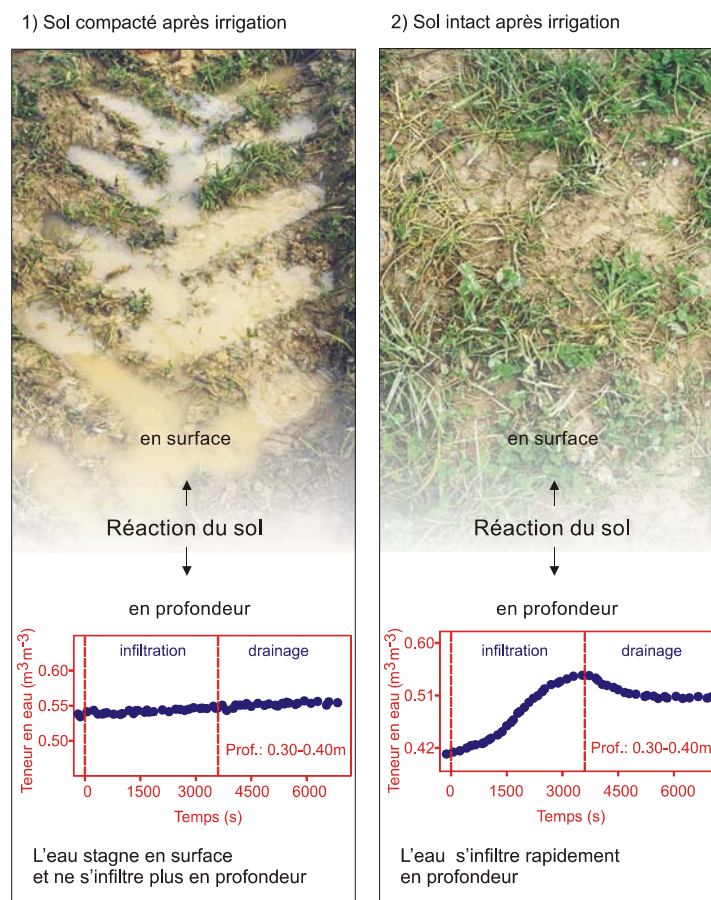


Figure 16: Exemples de réaction du sol suite à une irrigation; 1) sol compacté, 2) sol intact; cas de Frauenfeld.

4.1.2 Classes intermédiaires

Entre les deux classes majeures citées ci-dessus, il peut exister différentes réactions de θ illustrant des classes intermédiaires de compaction. Dans ce cas, l'eau ne stagne pas en surface du sol mais peut pénétrer en profondeur. Ce type de comportement est caractérisé par:

- Une augmentation restreinte de θ dépassant rarement 5 – 6 %.
- L'augmentation de θ est observée uniquement en surface entre 0.10 et 0.50 m.

Le cas de Grenchen illustre bien cet exemple.

4.1.3 Analyse détaillée des processus hydrodynamiques

Dans un sol structuré à double porosité, les deux domaines de porosité à savoir la microporosité et la macroporosité contribuent d'une manière plus ou moins indépendante à l'écoulement général. Dans ce cas, l'évaluation de la contribution des deux domaines de porosité dans le transport est nécessaire pour l'évaluation de la compaction. Toutes les méthodes existantes dans ce domaine ne considèrent que la microporosité (prélèvement d'échantillons de petite taille pour les analyses au laboratoire) et négligent la macroporosité, structure grossière du sol non incluse à l'échelle de l'échantillon. Notre propos est donc motivé par la nécessité d'évaluer la part de contribution hydrodynamique des macropores pendant l'irrigation. La séparation entre microporosité et macroporosité au niveau de l'évolution des profils de θ est tentée par l'application du modèle MACRO (Jarvis, 1994). La teneur en eau obtenue est rapportée à une teneur en eau limite, appelée ici indice de vide critique IVC servant de référence et obtenu par un test de compression oedométrique (Fig. 17). Le cas de la région de Kirchberg illustre bien cette analyse.

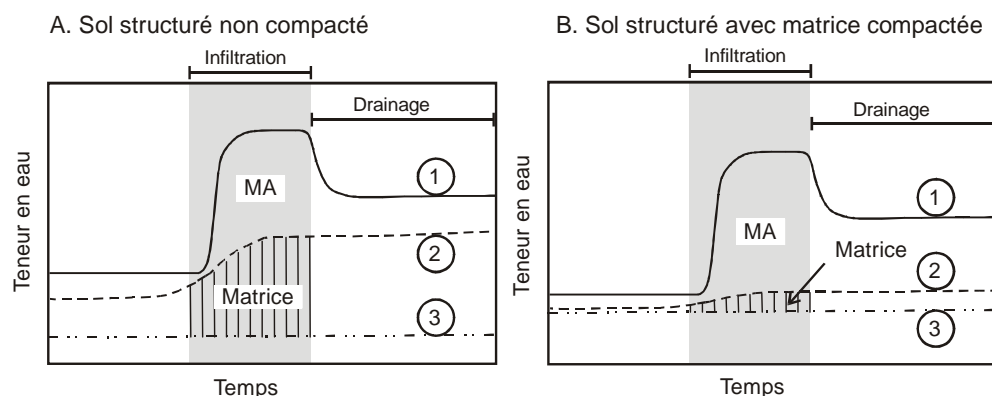


Figure 17: Compaction affectant la matrice du sol; courbe 1: teneur en eau mesurée; courbe 2: limite entre matrice et macropores déterminée par le modèle MACRO; courbe 3: limite de compression de référence obtenue par le test de compression oedométrique; MA: macroporosité.

4.2 Exemples d'application

Dans ce chapitre, l'étude de la compaction a été considérée selon deux cas:

- Détermination de la compaction en référence à un sol témoin non compacté (cas de Frauenfeld et de Grenchen).
- Détermination de la compaction en référence au test oedométrique déterminé au laboratoire (cas de Kirchberg).

4.2.1 Détermination de la compaction en référence à un sol témoin non compacté

CAS DE FRAUENFELD

Les essais d'irrigation ont été effectués au lieu dit: *Grosssteinacht* à Frauenfeld, commune de Frauenfeld (270.475/708.075, carte no. 1053, 1:25 000) (Mdaghri Alaoui & Germann, 2000).

Sol étudié	Le sol de cette région est un sol brun consistant en un dépôt alluvial. Il est composé d'un matériel limono-silteux localisé entre 0 et 0.60 m. A une profondeur inférieure à 0.60 m, se localise un matériel sableux à sablo-limoneux. La nappe phréatique composée de graviers grossiers se situe à environ 1.20 m. L'examen du profil du sol révèle l'existence d'un réseau de macropores visible à l'œil nu, dû à l'activité biologique importante (racines, verres de terres) allant jusqu'à une profondeur de 0.60 à 0.70 m.
Site expérimental	Dans cette étude, la teneur en eau $\theta(t)$ a été mesurée à l'aide de sondes TDR afin d'évaluer la compaction du sol causée par le passage d'une machine lourde (machine de 10 tonnes, type <i>Kleine</i> SF10 récolteur intégrale de betteraves, quatre roues, pneumatique avant: 710/70R38, pneumatique arrière: 700/50-26.5, charge avant roue droite: 10885 kg, charge arrière roue droite: 5349 kg, quatre passages). L'évolution de la teneur en eau enregistrée durant des irrigations contrôlées, dans un sol compacté a été comparée à celle enregistrée dans un sol intact (pas de passage de machine). Les deux points de mesure d'une surface d'1 m ² chacun, sont espacés d'1.20 m. Une fosse a été exécutée au milieu pour permettre l'insertion horizontale des sondes dans le sol de chacun d'eux.
Caractéristiques des essais	Deux essais d'irrigation ont été effectués sur chacun des deux points de mesure. Les caractéristiques de ces essais sont représentés dans le tableau 2 . Les deux points de mesure ont été irrigués successivement par le simulateur de pluie. La teneur en eau a été enregistrée automatiquement à 0.20, 0.40, 0.50 et 0.70 m aux deux profils du sol.

Tableau 2: Caractéristiques des essais d'irrigation; région de Frauenfeld.

Caractéristiques	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai	
	Sol intact	Sol compacté	Sol intact	Sol compacté
Date de l'irrigation	15.11.1999	15.11.1999	16.11.1999	16.11.1999
Début de l'infiltration	12h08	14h00	11h13	12h45
Fin de l'infiltration	13h08	15h00	12h13	13h45
Durée de l'infiltration	01h00	01h00	01h00	01h00
Intensité	24 mm/h	24 mm/h	24 mm/h	24 mm/h

Résultats et interprétations

Dans ce travail, les courbes de $\theta(t)$ obtenues dans le sol intact indiquent une augmentation nette de θ et une baisse rapide de celle-ci juste après l'arrêt de l'irrigation. L'existence d'un réseau de macropores mise en évidence par l'examen du profil du sol appuyé par ces observations (profils de θ) indiquent une large contribution des macropores à l'écoulement total.

Lors des deux essais effectués sur le sol intact (sans passage de machine), l'eau s'infiltre jusqu'à une profondeur de 0.50 m. En effet, les sondes TDR indiquent une nette augmentation de la teneur en eau à 0.20 m, 0.40 m et 0.50 m. A 0.70 m, la teneur en eau ne varie plus (**figure 18**). L'eau apportée sur la surface du sol intact s'infiltre au fur et à mesure de l'avancement de l'irrigation.

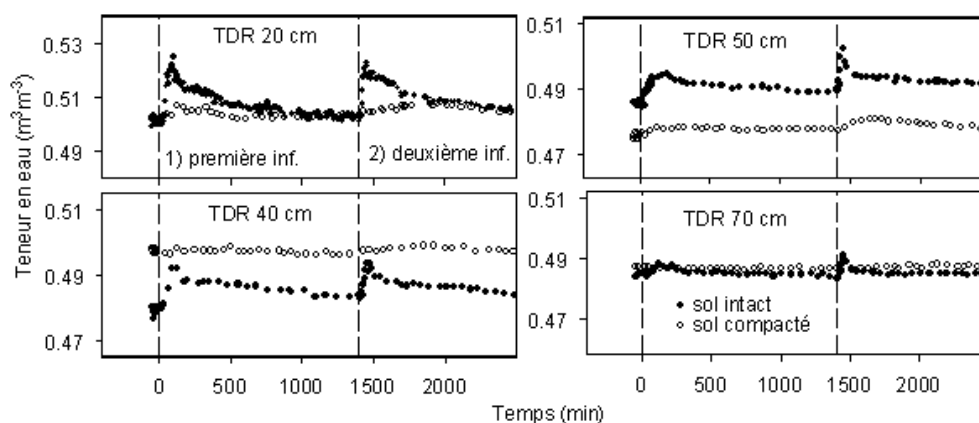


Figure 18: Evolution des profils de teneurs en eau à 0.20, 0.40, 0.50 et 0.70 m durant les deux essais d'infiltration. Comparaison entre sol intact et sol compacté; $t = 0$ min correspond au début de l'irrigation; région de Frauenfeld.

L'augmentation de la teneur en eau dans le sol intact est présentée dans le **tableau 3**. Cette augmentation est significative car l'erreur sur la mesure de θ ne dépasse pas 1 % (Roth et al., 1990). Le temps Δt correspondant à l'augmentation de la teneur en eau $\Delta\theta$ diminue de moitié lors du deuxième essai d'irrigation. Il est important de noter que malgré l'humidité élevée du sol, l'augmentation de la teneur en eau, suite à l'apport, reste significative. Cette augmentation de $\theta(t)$ serait probablement encore plus importante dans un sol plus sec.

Par contre, le sol compacté présente une augmentation non significative de la teneur en eau lors des deux essais d'irrigation. Ceci montre clairement que la structure du sol compacté a subi une déformation notable exprimée essentiellement par la diminution de son volume poral. Cet état de fait est mis en évidence par l'existence de flaques d'eau observées en surface du sol compacté prouvant explicitement que l'eau ne s'infiltre pas en profondeur.

Tableau 3: Augmentation de la teneur en eau lors des deux essais d'irrigation $\Delta\theta=(\theta_{\max}-\theta_{\text{init}})$ et temps correspondant Δt sur le sol témoin non compacté à Frauenfeld, t_0 est le temps du début de l'irrigation, t_1 est le temps pour atteindre θ_{\max} . L'erreur sur le temps est de 5 min.

Profondeur (m)	Essai 1		Essai 2	
	$\Delta\theta$ (%volume)	$\Delta t=(t_1 - t_0)$ (min)	$\Delta\theta$ (%volume)	$\Delta t=(t_1 - t_0)$ (min)
0.20	2.40	69	1.80	34
0.40	1.60	64	1.12	30
0.50	0.90	69	1.20	34
0.70	0	/	0	/

CAS DE GRENCHE

Terrain sélectionné pour les essais d'infiltration

Le terrain choisi pour nos essais est situé à Grenchen au lieu dit *Galmen* dont la partie centrale couvre le toit du tunnel de l'autoroute liant Soleure à Bienne au niveau du tronçon A5. Sa superficie est de 3 hectares. La partie centrale et sud consiste en un sol reconstruit (sol non compacté) et la partie nord représente un sol naturel (sol compacté) (**Fig. 19**). Il s'agit d'un pseudo-gley dont le dépôt est d'origine lacustre. Dans le sol naturel, entre 0 et 3 m se localise un matériel argileux. Au-dessous de 3 m, se localise un matériel plutôt sableux. Dans le sol reconstruit, les premiers 0.60 m ont été constitués d'un matériel argileux originaire d'un horizon A. Entre 0.60 m et 1.10 m, se localise un matériel sablo-limoneux originaire d'un horizon B. Entre 1.10 m et le toit du tunnel, se localise l'horizon C constitué d'un matériel sableux assurant le drainage et la protection du tunnel.

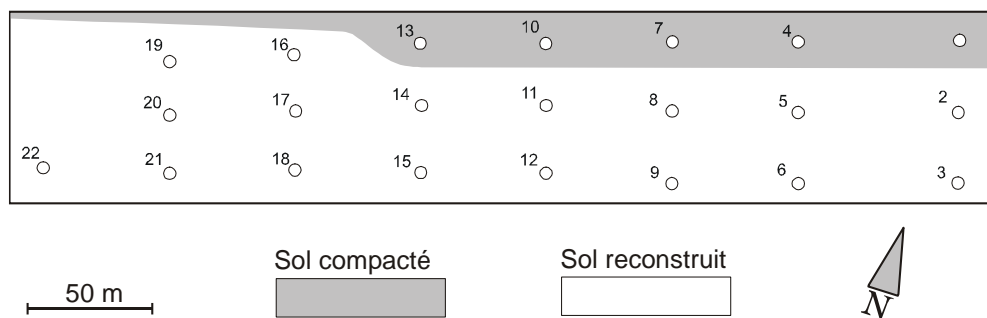


Figure 19: Réseau de points de mesure sélectionnés pour les essais d'infiltration à Grenchen; à chaque point, la teneur en eau a été mesurée à 5 profondeurs.

Caractéristiques des essais d'infiltration

Sur chaque point de mesure, une irrigation à l'eau pure a été appliquée (Alaoui, 2002). Les essais d'infiltration ont été effectués durant 1 heure avec une intensité de 0.7 l/min, soit 41.8 mm/h (ou 1.16×10^{-5} m/s). Le volume d'eau total infiltré était de 42 l. Au total, chaque expérience a duré 3 heures/point (soit 1 heure d'apport et 2 heures de drainage) durant lesquelles, la teneur en eau à 5 profondeurs (0.10 – 0.20, 0.20 – 0.30, 0.30 – 0.40, 0.40 – 0.50 et 0.50 – 0.60 m) a été mesurée. L'intervalle de temps de mesures était de 60 secondes.

Interprétation des résultats obtenus

Les résultats des 21 essais d'infiltration effectués dans la plaine à Grenchen sont présentés dans le rapport de Alaoui (2002). L'analyse des variations hydrodynamiques de l'humidité du sol concerne particulièrement les profondeurs 0.30 – 0.40 et 0.40 – 0.50 m, vu que la réaction du sol en surface (0.10 – 0.20 et 0.20 – 0.30 m) dépend plutôt de l'intensité de la pluie et de la teneur en eau initiale que des facteurs externes tels que la compaction et par conséquent de la modification de sa structure. La profondeur 0.50 – 0.60 m n'a pas été prise en considération car elle a montré peu de réaction durant l'irrigation.

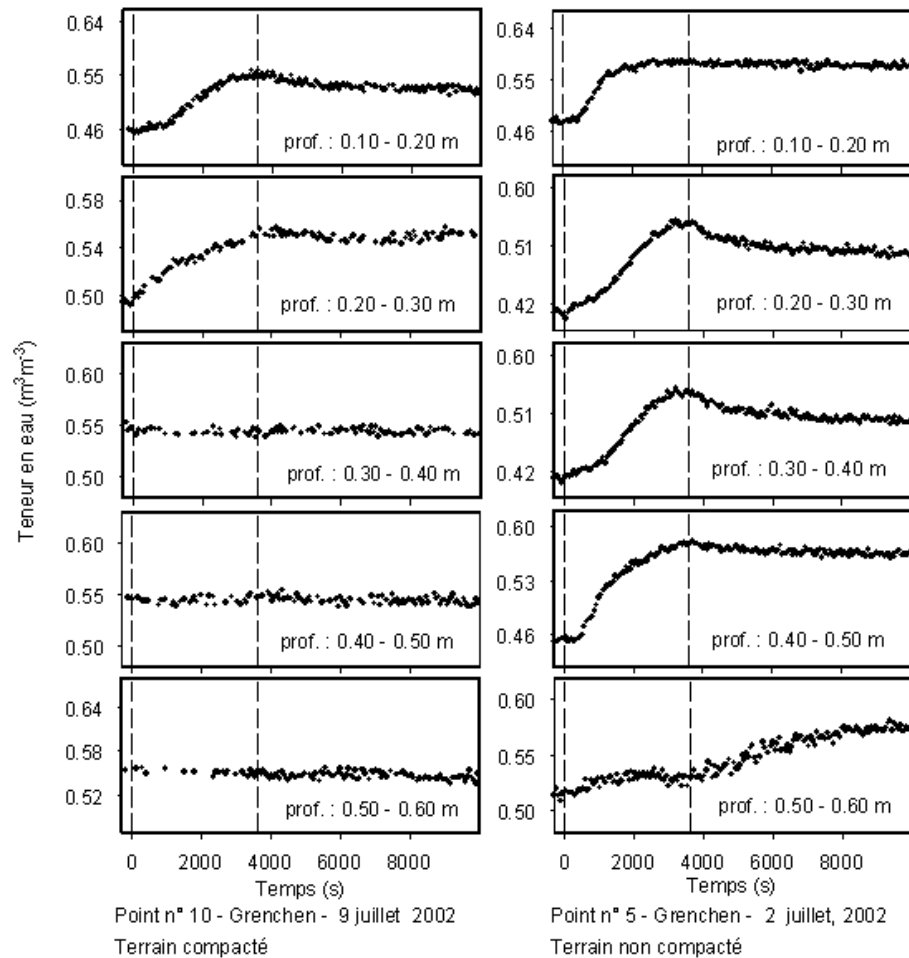


Figure 20: Exemples de réaction du sol à Grenchen. Point 10: sol compacté; point 5: sol reconstruit non compacté.

Sol compacté: La réaction du sol compacté (points n° 4, 7, 10 et 13, **Fig. 19**) est plus homogène et montre l'absence d'augmentation de la teneur en eau durant l'apport d'eau, sauf au point 7 qui montre une augmentation relative de celle-ci. Cette exception peut s'expliquer par la faible teneur en eau initiale à cet endroit avoisinant les 42 % à ces deux profondeurs (0.30-0.40 et 0.40-0.50 m). Il est important de noter que dans ces sols, en l'absence de pluie et à une certaine température, des fissures de dessiccation d'environ 4 à 6 cm de largeur se forment et sont visibles en surface du sol. L'autre facteur à mettre en évidence est le fort trafic de machines lourdes au niveau du point 4 (communication orale, M. Rohr du bureau Geotest) dont le sol est nettement plus compacté et n'accuse aucune augmentation de la teneur en eau (voir aussi Mdaghri-Alaoui et Germann, 2000). D'une manière générale, on note une absence de réaction du sol compacté (**Fig. 20**) mise en évidence par les mesures TDR enregistrées à 3 points sur 4 soit une absence de réaction de 75 % de points dans le sol compacté.

Sol reconstruit: Les teneurs en eau mesurées aux profondeurs 0.30 – 0.40 et 0.40 – 0.50 m aux points situés sur le sol reconstruit, montrent que 71 % des points ont manifesté une augmentation de la teneur en eau durant l’essai d’infiltration. Cet état de fait montre que le sol reconstruit est nettement plus perméable que le sol naturel non compacté. L’absence de réaction des 29 % des points situés sur le terrain reconstruit peut s’expliquer par la présence d’écoulements latéraux à ces profondeurs ou encore la présence de cavités de vides importantes empêchant les flux d’eau brusques et intenses de s’écouler en profondeur. Ces cavités d’air ont été observées dans les échantillons de sol prélevés à différentes profondeurs lors de la campagne de forage. Un exemple de réaction du sol compacté et du sol reconstruit non compacté est illustré dans la **figure 20**.

4.2.2 Détermination de la compaction en référence au test oedométrique déterminé au laboratoire

CAS DE KIRCHBERG

Dans cet exemple, les profils de teneurs en eau ont été considérés par rapport à une teneur en eau de référence correspondant à la compaction maximale de l’échantillon du sol déterminée par un test oedométrique. Cet exemple met en évidence les principales étapes proposées pour l’évaluation de la compaction d’un sol à double porosité. L’investigation s’effectuera tant sur le terrain qu’au laboratoire. Les mesures hydrodynamiques de la teneur en eau, effectuées à quatre profondeurs, ont permis de différencier entre un sol intact et un sol reconstruit d’une part et un sol structuré et un sol moins structuré d’autre part. Un essai de coloration au bleu de méthylène a été effectué pour vérifier les observations obtenues par les mesures TDR.

Emplacement et description du sol

La **figure 21** montre l’emplacement des sols choisis pour les essais d’infiltration. La parcelle A présente un sol naturel de pâturage compacté par le passage intense des vaches. Le matériel limoneux qui le compose, est situé entre 0 et 0.70 m. Les sols des points de contrôle 1 et 2, situés sur la parcelle A sont des sols bruns lessivés.

Les parcelles B et C sont des sols reconstruits. La limite entre sol (ou subsurface) et sous-sol est située à 0.35 m. La parcelle B est composée d’un matériel limoneux localisé entre 0 et 0.60 m et d’un limon argileux entre 0.60 et 0.70 m. Le sol et le sous-sol sont reconstruits en été 2002. La parcelle C est composée d’un matériel limoneux localisé entre 0 et 0.50 m et d’un limon argileux situé entre 0.50 et 0.70 m. Le sol se distingue par une fraction grossière plus importante. Dans cette parcelle, le sous-sol est reconstruit en 2001 et le sol en 2002.

Il est important de noter que la porosité des sols reconstruits des parcelles B et C est relativement plus élevée que celle du sol du point 1 situé dans le pâturage.

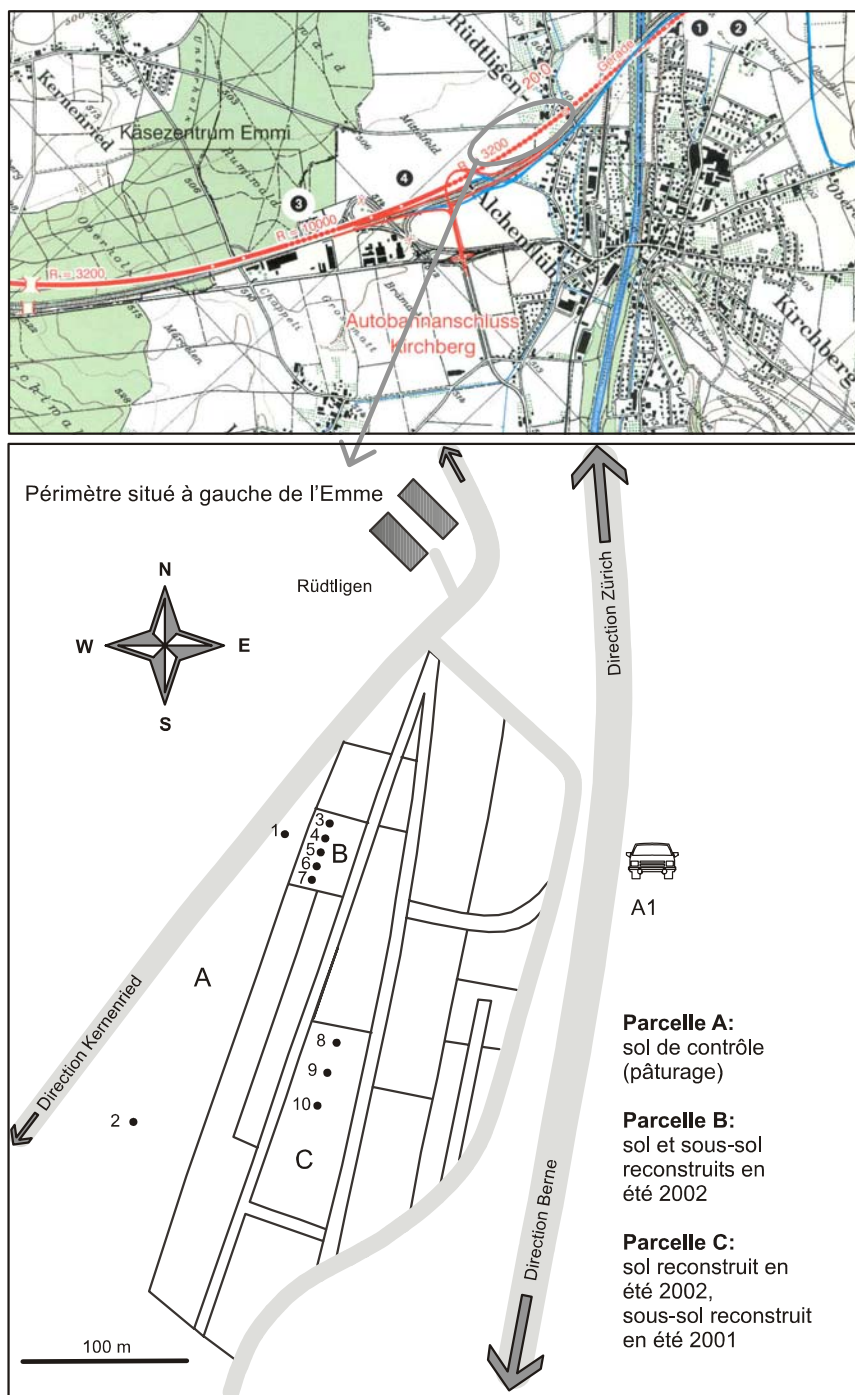


Figure 21: Emplacement du terrain d'investigation à Kirchberg. Carte reproduite avec l'autorisation de l'office fédéral de topographie (JD042503).

**Essais d'infiltration et
essais de traçage**

Sur chaque point, trois irrigations successives à l'eau pure d'une durée d'une heure espacées d'une heure de drainage ont été effectuées. L'intensité de chaque irrigation était de 0.5 l/min, soit 30 mm/h (ou 8.33×10^{-6} m/s).

La mesure de la teneur en eau a été effectuée aux quatre profondeurs environ un quart d'heure avant la première irrigation et a duré 6 heures. L'intervalle de temps de mesure a été fixé à 60 secondes.

Deux essais de traçage ont été effectués successivement aux points 1 et 2. 10 gr du bleu de méthylène ont été dilués dans 1 litre d'eau puis répandus d'une manière uniforme sur une surface d'un m² aux deux points. Tout de suite après, une irrigation à l'eau pure, de mêmes caractéristiques que les essais précédents, a été imposée sur la surface du sol pour faciliter l'infiltration du traceur vers le bas. Cette manière de faire permet de marquer en particulier les macropores. Le comptage des macropores a été fait sur chaque profil ou section. Le nombre de macropores entre deux sections a été déterminé et a permis de fournir une densité moyenne à partir de laquelle, le nombre total des macropores dans le volume du sol considéré a été défini.

**Simulation de la teneur
en eau par le modèle
MACRO**

Le but de la simulation de θ (mesurée) par le modèle MACRO (Jarvis, 1994) était de définir la limite entre le domaine des micropores et celui des macropores et d'évaluer la part de contribution de chacun d'eux dans le transport d'eau.

Le modèle MACRO permet la simulation de l'écoulement d'eau, de solutés et de colloïdes en zone non saturée et saturée. Dans ce modèle, la porosité totale est divisée en micropores et macropores. La limite entre ces deux domaines est caractérisée par une teneur en eau θ_b , une succion ψ_b et une conductivité hydraulique K_b séparant les deux régions.

La simulation peut être effectuée en tenant compte du transport dans deux domaines de flux (microporosité et macroporosité) ou uniquement dans un seul domaine de flux (micropores si le milieu est dépourvu de structure). Dans un seul domaine, chaque couche du sol est représentée par une simple valeur de teneur en eau et de conductivité et le calcul du flux d'eau est réduit à une simple solution numérique de l'équation de Richards (1931) (Jarvis, 1994). Dans deux domaines, on suppose que le flux d'eau s'effectue par gravité dans les macropores (la succion n'est pas exigée) et des expressions équivalentes à celles de Brooks & Corey (1964) et de Mualem (1976) sont utilisées (Jarvis, 1994, Alaoui et al., 2003).

**Résultats et
interprétation**

Une réponse positive du sol signifie une augmentation de θ suite à l'apport d'eau en surface par opposition à une absence de réaction. Cette terminologie sera utilisée pour caractériser la réponse hydrodynamique des sols considérés.

Les points de mesure 1 et 2 sont situés dans le pâturage (parcelle A) dont la compaction a été provoquée par le passage régulier et intensif des vaches.

Les profils de teneur en eau (**Fig. 22**) montrent une réaction positive du sol du point 1 à l'irrigation durant les trois essais d'infiltration et à toutes les profondeurs exceptées à la profondeur 0.30–0.40 m durant la première infiltration. A 0.50–0.60 m, la teneur en eau n'a pas été mesurée pour des raisons techniques. A titre de comparaison, le sol du point 2 répond moins fréquemment à l'apport d'eau.

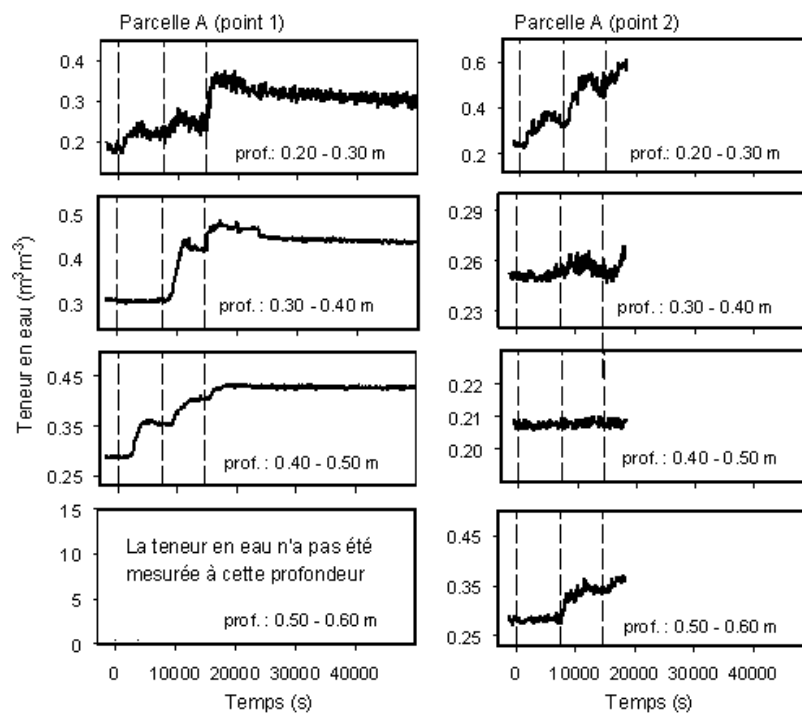


Figure 22: Réaction du sol compacté de Kirchberg à une série d'irrigations.

Deux points importants sont à noter quant aux réponses des deux premiers points de mesure:

1. Les deux premiers points particulièrement le point 1, situés sur le même terrain (pâturage) réagissent d'une manière positive suite à l'apport d'eau malgré la compaction du sol à ces endroits.
2. Les deux points 1 et 2 ne réagissent pas de la même manière lors de l'irrigation.

Ces deux observations sont discutées dans les sections suivantes (voir résultats des essais au bleu de méthylène).

La **figure 23** montre un exemple de réaction du sol reconstruit: parcelle B (point 5) et parcelle C (point 9).

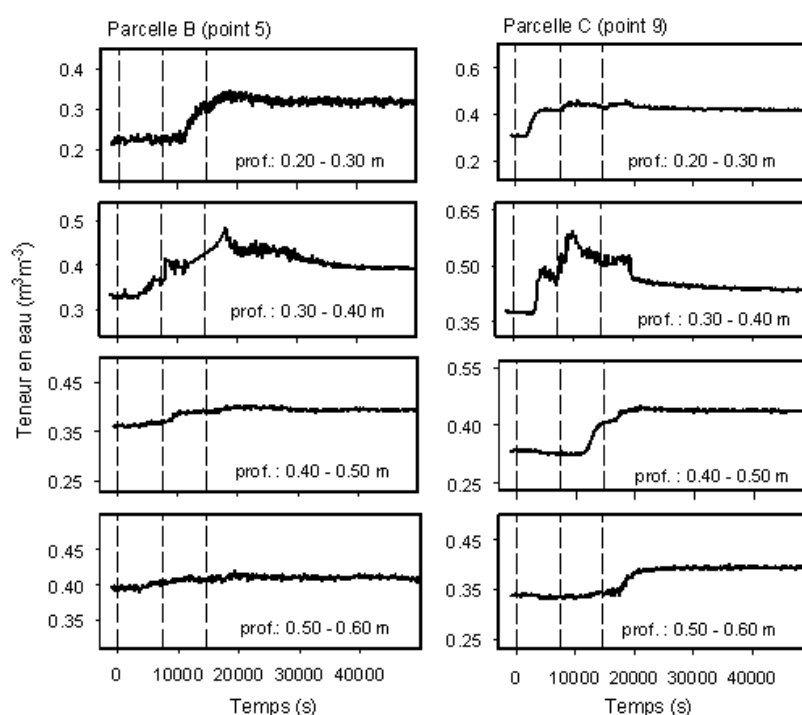


Figure 23: Réaction du sol reconstruit de Kirchberg à une série d'irrigations.

Essais au bleu de méthylène: Il ressort de l'examen des profils que le point 1 possède un réseau de macropores beaucoup plus dense exprimé par un volume 10 fois plus important que celui du point 2 (**Tableau 4**).

Tableau 4: Caractéristiques des macropores déterminées par les essais de traçage.

Caractéristiques des macropores	Point 1	Point 2
Diamètre moyen	8 mm	5 mm
Longueur moyenne	0.70 m	0.50 m
Réseau	continu	discontinu
Volume total	0.014 (m ³ /m ³)	0.0016 (m ³ /m ³)

Sur la base de l'examen *in situ* des profils et considérant un volume total de 0.70 m³ du sol, le volume de la macroporosité a été estimé à 0.014 m³/m³ au point 1 et à 0.0016 m³/m³ au point 2. Les macropores sont d'origine biologique et présentent une grande stabilité due à la matrice très fine et très compactée. En effet, les macropores sont très résistants à la compression verticale du sol. Leur continuité, leur

stabilité et leur intensité permettent au sol de réagir d'une manière optimale à l'irrigation (transport d'eau et aération).

Modélisation de θ par le modèle MACRO: La modélisation de la teneur en eau a été effectuée par la méthode inverse en calant le modèle sur les courbes de θ mesurées à 0.20 – 0.30 m. La calibration automatique a été faite à l'aide du programme *qmodel* (Acutis et al., 2001) décrit en détail par Alaoui et al. (2003). Elle a permis d'évaluer la part de contribution des macropores et des micropores dans le transport d'eau (**Fig. 24**). Le modèle montre que les macropores du sol des points 1 et 2 sont intacts et contribuent d'une manière significative au transport d'eau.

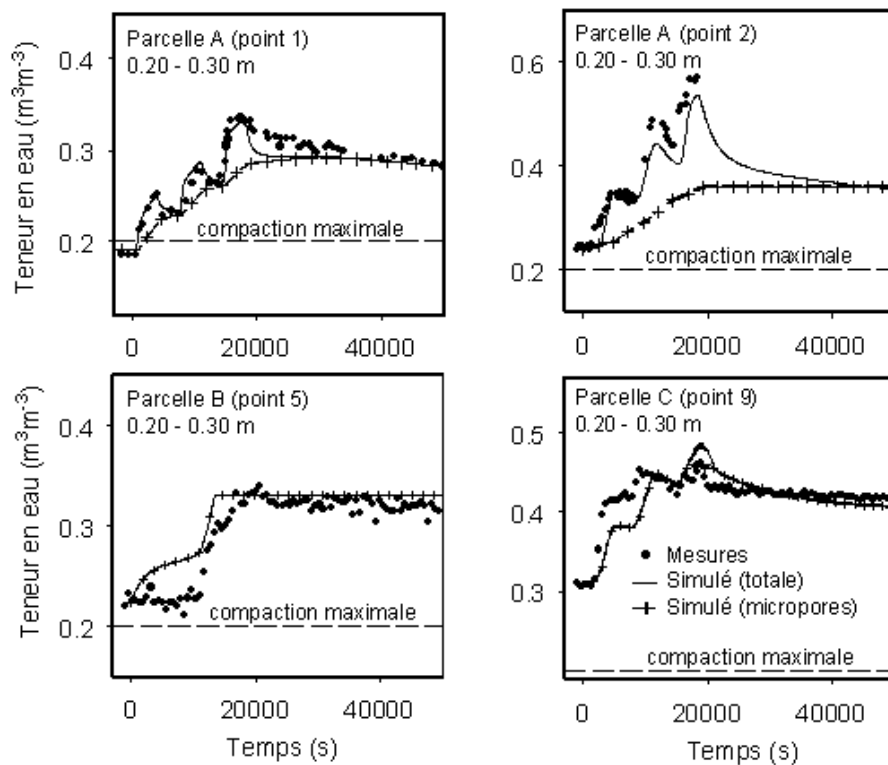


Figure 24: Evolution des teneurs en eau à la surface du sol (0.20 – 0.30 m) pour les points 1, 2, 5 et 9: confrontation entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées par le modèle MACRO; la limite de la compaction maximale a été obtenue par des mesures oedométriques; Kirchberg, Rüdltigen (Berne).

Dans le sol reconstruit (parcelle B 'point 5' et C 'point 9'), les meilleures simulations de θ à 0.20 – 0.30 m ont été obtenues en considérant un seul domaine de flux excluant le flux préférentiel (**Fig. 24**). Cet état de fait conforte nos observations, à savoir un réseau de macropores restreint et une porosité (microporosité) plus élevée à ces endroits. Le volume total des macropores estimé, représentant 0.16 % et 1.4 % du volume total, a permis de transporter 100 % et 70 % du volume total d'eau, respectivement au point 2 et 1, si l'on considère la tranche du sol entre 0.20 et 0.30

m comme échelle spatiale et un événement hydrologique bref (troisième infiltration) comme échelle temporelle.

Test de compression oedométrique: Les mesures oedométriques ont été effectuées par imposition d'une contrainte mécanique de 1000 kPa. Le choix d'une telle contrainte est justifié par le fait qu'au-delà de cette limite, la teneur en eau correspondant à l'état de compression final ne change pas d'une manière significative et qu'une contrainte supérieure peut provoquer la déformation du minéral. Les analyses de compression ont été réalisées au laboratoire de mécanique des sols et des roches de l'EPFL. Ils ont permis de situer la limite de la compression maximale du sol. La limite de compaction maximale obtenue par le test et reportée dans la **figure 24** correspond à une teneur en eau de 20 %.

La limite de compaction maximale obtenue par le test montre que dans les deux points, 1 et 2, la microporosité, déterminée par le modèle MACRO, est supérieure à la limite maximale de compaction (**Figure 24**). Ces observations révèlent qu'une partie de la microporosité est préservée et permet le transport actif de l'eau durant les irrigations.

La **figure 24** montre que la teneur en eau maximale mesurée aux points 5 (parcelle B) et 9 (parcelle C) lors des trois essais d'irrigation dépasse largement celle de la compaction maximale déterminée par oedométrie. La différence entre θ maximale observée et θ correspondant à la limite de compaction maximale a été de 14 % au point 5 et de 26 % au point 9. Notons que la faible augmentation de θ observée au point 5 est due à la faible θ initiale mesurée à cet endroit (22 % au point 5 contre 31 % au point 9). Ces résultats ont permis de mettre en évidence le rôle actif de la partie non détruite de la microporosité du sol.

Comparaison entre parcelle A, B et C: Les points 1 et 2, situés sur le pâturage, présentent des profils de teneur en eau caractéristiques d'un flux préférentiel à savoir une augmentation de la teneur en eau suivi d'un drainage assez rapide immédiatement après l'arrêt de l'infiltration (Alaoui et al., 2004). Ceci est particulièrement observé au point 1 à 0.30 – 0.40 m lors de la deuxième infiltration ou la différence entre θ maximale et θ finale enregistrée à un temps $t \leq 27$ minutes est de 3.1%. Dans le cas de Kirchberg, au-delà de cet intervalle, la valeur de θ finale ne change pas d'une manière significative. A titre de comparaison, aucune courbe ne présente une telle différence en si peu de temps. Les courbes de θ enregistrées dans la parcelle B (points 3, 4, 5, 6 et 7) et dans la parcelle C (points 8, 9 et 10) sont caractérisées par une baisse de θ très amortie (Alaoui et al., 2004).

Les vitesses de progression du front d'humectation estimées dans la parcelle A sont plus importantes, atteignant 9.72×10^{-4} m/s au site 1 et 8.33×10^{-4} m/s au site 2, alors qu'elles restent restreintes et sont comprises entre 0.1×10^{-4} et 3.8×10^{-4} m/s dans le sol reconstruit des parcelles B et C. Ces résultats permettent de distinguer entre un sol naturel structuré et un sol jeune, récemment reconstruit.

4.3 Tentative de classification de la compaction

Une tentative de classification de la compaction a été effectuée sur la base des trois exemples discutés ci-dessus: le cas de Frauenfeld, le cas de Grenchen et le cas de Kirchberg (**Tableau 5**).

Ces trois classes de compaction sont indépendantes du type de texture et feront l'objet d'investigation supplémentaire pour affiner la classification.

Tableau 5: Classification de la compaction du sol dans un milieu à double porosité.

Compaction très importante	signe
• Microporosité très réduite	-
a) Macroporosité détruite (Frauenfeld)	-
b) Macroporosité très développée (Kirchberg, points 1 et 2)	+
Compaction moyenne ou localisée	signe
• Macroporosité détruite	-
c) Microporosité détruite (Grenchen: points 4, 10, 13)	-
d) Microporosité préservée (Grenchen, point 7)	+
Pas de compaction	signe
• Microporosité préservée	+
• Macroporosité très développée	+

5 Conclusions

La méthode développée par Alaoui (2002) a le principal avantage d'être directe, non destructive et permet d'évaluer les principales fonctions de la structure du sol qui sont le transport d'eau et l'aération. Applicable *in situ*, elle permet l'investigation d'un sol dans son état réel sans provoquer sa perturbation. Cette manière de faire permet l'évaluation de la structure grossière et la comparaison entre différents sols.

Dans ce manuel nous avons présenté une description détaillée du matériel et de son utilisation ainsi que les instructions à suivre pour l'investigation de la compaction tant sur le plan technique que scientifique.

L'analyse des processus hydrodynamiques a été effectuée sur la base de trois exemples d'application *in situ*. Il a été démontré que la détermination de la part de contribution des grands pores, appelés 'macropores', au transport d'eau est décisive dans l'évaluation de la compaction des sols.

Dans l'**annexe III**, figure une proposition du développement de la méthode par Alaoui.

L'apparition de nouvelles versions du software et le développement de la technologie impliquera une révision de ce manuel.

Annexes

A1: Time Domain Reflectometer

Principle

TDR is a technique used to measure the reflection time t of an electromagnetic wave in a medium (soil). The time generated by the TDR unit is expressed in 10^{-9} m/s.

The straight rods serve as conductors and the soil between the conductors is the dielectric medium. The rods act as wave guide and the signal propagates as a plane wave.

For measurement, steplike electromagnetic signals are transmitted into the soil along the guide. When the signal has travelled to the end of the guide, it is reflected back to the instrument where its return is recorded (Fig. 1).

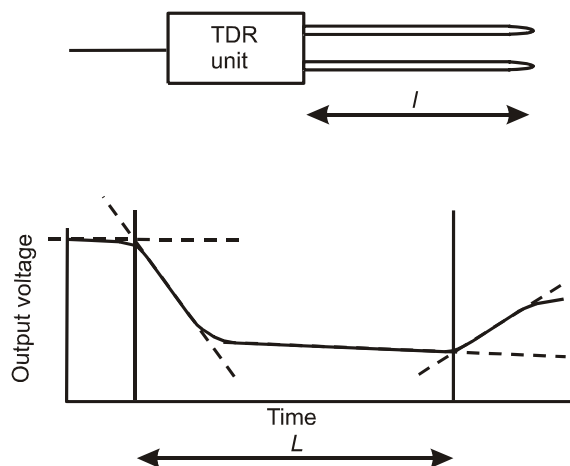


Figure 1. Evaluation of typical TDR trace. The time it takes the pulse to move down the TDR probe and back is proportional to the distance L between the intersections of two tangents, as indicated by the dotted lines; l is the length of the wave guide ($L = 2.l$).

If the dielectric constant of the material is high, the signal propagates more slowly. Because the dielectric constant of water is much higher than most other materials, a signal within a wet or moist medium propagates more slowly than in the same medium when dry. Ionic conductivity affects the amplitude of the signal but not the propagation time. Thus, moisture content can be determined by measuring the propagation time over a fixed length probe embedded in the medium being measured.

This signal depends on the velocity of the signal and the length of the wave guide. The velocity depends on the dielectric constant of the material surrounding the wave guide (soil). The relationship can be expressed by:

$$\varepsilon_c = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot l} \right)^2 \quad (1)$$

or

$$t = \frac{2 \cdot l \cdot \sqrt{\varepsilon_c}}{c} \quad (2)$$

where ε_c is the dielectric constant of soil, c is the velocity of electromagnetic signals in free space ($c = 3 \times 10^8$ m/s), t is the travel time, and l is the wave guide length ($L=2 \cdot l$).

The relationship between dielectric constant and volumetric water content has been described by, among others, Topp et al. (1980) in an empirical fashion using polynomial form. Although calibration equation does not require the determination of any additional soil parameters, its validity has not been demonstrated for the whole range of possible water contents and porosities.

Calibration according to Roth et al. (1990)

The calibration according to Roth et al. (1990) is based on the dielectric mixing model of Dobson et al. (1985). The mixing law approach was used to obtain a single calibration curve whose validity is not restricted to laboratory conditions, specific soil types, or to a limited water content range. The dielectric mixing model relates the composite dielectric number of a multiphase mixture to the dielectric numbers and volume fractions of its constituents. The mixing law used considers three-phase system to describe wet soil:

$$\theta = \frac{\zeta_c^\alpha - (1 - \eta) \zeta_s^\alpha - \eta \zeta_a^\alpha}{\zeta_w^\alpha - \zeta_a^\alpha} \quad (3)$$

where

α summarizes the geometry of the medium with relation to the applied electric field

η is the porosity of soil

$$\begin{aligned} \zeta_w &= \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_w(20^\circ)} = \frac{\text{dielectric number of aqueous soil phase}}{\text{dielectric number of pure water at } 20^\circ\text{C}} = \frac{82.612}{80.36} = 1.028 \\ \zeta_s &= \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_w(20^\circ)} = \frac{\text{dielectric number of solid}}{\text{dielectric number of pure water at } 20^\circ\text{C}} = \frac{3.9}{80.36} = 0.04853 \\ \zeta_c &= \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_w(20^\circ)} = \frac{\text{dielectric number of gaseous soil phase}}{\text{dielectric number of pure water at } 20^\circ\text{C}} = \frac{1}{80.36} = 0.012444 \end{aligned}$$

$\varepsilon_w(T)$ was defined for a temperature $T = 14^\circ\text{C}$ according to the following equation:

$$\varepsilon_w(T) = 78.54[1 - 4.579 \times 10^{-3}(T - 25) + 1.19 \times 10^{-5}(T - 25)^2 - 2.8 \times 10^{-8}(T - 25)^3]$$

Measurements of volumetric water content and dielectric number at eleven different field sites representing a wide range of soil types were used to determine the parameter α of the model by weighted nonlinear regression. Varying the values for the observed (thermogravimetric) water content, composite dielectric number, and temperature at random and independently of each other within a range given by the uncertainty of each parameter, and repeating the minimization procedure 1000 times, the uncertainty $\sigma_\alpha = 0.007$ was found for the optimized value of $\alpha = 0.46$ (Roth et al., 1990).

Setting:

$$\alpha = 0.46$$

$$l = 0.15 \text{ m (length of rods used here)}$$

$$\zeta_w = 1.028; \zeta_s = 0.04853; \zeta_a = 0.012444$$

$$\eta = 0.465$$

Equation 3 will be simplified:

$$\theta = \frac{\left(\frac{t^2}{80.36}\right)^{0.46} - 0.1948}{0.87933} \quad (4)$$

The reflection time t will be recorded in 10^{-9} m/s by instruction 119 using TDR unit.

Note that the program written with *Edlog* using equation (4) to measure water content is valid for rods with a length of 0.15 m.

The following programs are written to measure directly the water content according to Roth et al. (1990).

References

- Dobson M.C., Ulaby F.T., Hallikainen M.T., Fl-Rayes M.A., 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. II. Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-23(1): 35–46.
- Roth K., Schulm R., Flühler H. & Attinger W., 1990. Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach. *Water Resour. Res.*, 26(10): 2267–2273.
- Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16(3): 574–582.

Program for one TDR probe

```
;{CR10X}
;Written with EDLOG program by A. Alaoui - 2004
;One diagonal TDR probe
;Water content is calculated directly according to Roth
(1990)
;Probe length = 0.15 m
*Table 1 Program
    01: 60          Execution Interval (seconds)
1:  TDR100 Measurement (P119)
    1: 00          SDM Address
    2: 00          Output Option
    3: 2001        MMMP Mux & Probe Selection  (Addressing scheme ABCR:
    4: 100          Waveform Averaging          A:Channel in the first Multiplexer
    5: 1.0          Vp                          B:Channel in the 2d. Multiplexer
    6: 256          Points                      C:Channel in the 3rd. Multiplexer
    7: 16.5         Cable Length (meters)       R:number of consecutive probes)
    8: 4            Window Length (meters)
    9: 0.144        Probe Length (meters)
   10: 0.081        Probe Offset (meters)
   11: 1            Loc [ a                    ] (Click on the right key of the mouse to insert a)
   12: 1.0          Mult
   13: 0.0          Offset

2:  Z=F (P30)
    1: 0.46         F
    2: 00           Exponent of 10
    3: 2            Z Loc [ b                  ]

3:  Z=X*Y (P36)
    1: 1            X Loc [ a                  ]
    2: 1            Y Loc [ a                  ]
    3: 1            Z Loc [ a                  ]

4:  Z=X*F (P37)
    1: 1            X Loc [ a                  ]
    2: 0.01244      F
    3: 1            Z Loc [ a                  ]

5:  Z=X^Y (P47)
    1: 1            X Loc [ a                  ]
    2: 2            Y Loc [ b                  ]
    3: 1            Z Loc [ a                  ]

6:  Z=X+F (P34)
    1: 1            X Loc [ a                  ]
    2: -0.1948      F
    3: 1            Z Loc [ a                  ]

7:  Z=X*F (P37)
    1: 1            X Loc [ a                  ]
    2: 1.13723      F
    3: 1            Z Loc [ a                  ]
```

```

8:  Do (P86)
    1: 10      Set Output Flag High (Flag 0)

9:  Z=Z+1 (P32)
    1: 3      Z Loc [ c      ]

10: Real Time (P77)
    1: 111    Day,Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

11: Sample (P70)
    1: 1      Reps
    2: 1      Loc [ a      ]

12: Sample (P70)
    1: 1      Reps
    2: 3      Loc [ c      ]

*Table 2 Program
    02: 0.0000 Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

```

Program for three TDR probes

```
;{CR10X}
;Written with EDLOG program by A. Alaoui - 2004
;Three diagonal TDR probes
;Water content is calculated directly according to Roth
(1990)
;Probe length = 0.15 m
*Table 1 Program
    01: 30          Execution Interval (seconds)

1:  TDR100 Measurement (P119)
  1: 00          SDM Address
  2: 00          Output Option
  3: 2001        MMMP Mux & Probe Selection
  4: 100         Waveform Averaging
  5: 1.0         Vp
  6: 256         Points
  7: 16.5        Cable Length (meters)
  8: 4           Window Length (meters)
  9: 0.145       Probe Length (meters)
 10: 0.022       Probe Offset (meters)
 11: 1           Loc [ a          ]
 12: 1.0         Mult
 13: 0.0         Offset

2:  Z=F (P30)
  1: 0.46        F
  2: 00          Exponent of 10
  3: 4           Z Loc [ d          ]

3:  Z=X*Y (P36)
  1: 1           X Loc [ a          ]
  2: 1           Y Loc [ a          ]
  3: 1           Z Loc [ a          ]

4:  Z=X*F (P37)
  1: 1           X Loc [ a          ]
  2: 0.01244     F
  3: 1           Z Loc [ a          ]

5:  Z=X^Y (P47)
  1: 1           X Loc [ a          ]
  2: 4           Y Loc [ d          ]
  3: 1           Z Loc [ a          ]

6:  Z=X+F (P34)
  1: 1           X Loc [ a          ]
  2: -0.1948     F
  3: 1           Z Loc [ a          ]

7:  Z=X*F (P37)
  1: 1           X Loc [ a          ]
  2: 1.13723     F
  3: 1           Z Loc [ a          ]
```

```

8:  TDR100 Measurement (P119)
1:  00          SDM Address
2:  00          Output Option
3:  3001        MMMP Mux & Probe Selection
4:  100         Waveform Averaging
5:  1.0         Vp
6:  256         Points
7:  16.5        Cable Length (meters)
8:  4           Window Length (meters)
9:  0.145       Probe Length (meters)
10: 0.022       Probe Offset (meters)
11: 2           Loc [ b           ]
12: 1.0         Mult
13: 0.0         Offset

9:  Z=X*Y (P36)
1:  2           X Loc [ b           ]
2:  2           Y Loc [ b           ]
3:  2           Z Loc [ b           ]

10: Z=X*F (P37)
1:  2           X Loc [ b           ]
2:  0.01244    F
3:  2           Z Loc [ b           ]

11: Z=X^Y (P47)
1:  2           X Loc [ b           ]
2:  4           Y Loc [ d           ]
3:  2           Z Loc [ b           ]

12: Z=X+F (P34)
1:  2           X Loc [ b           ]
2:  -0.1948    F
3:  2           Z Loc [ b           ]

13: Z=X*F (P37)
1:  2           X Loc [ b           ]
2:  1.13723    F
3:  2           Z Loc [ b           ]

14: TDR100 Measurement (P119)
1:  00          SDM Address
2:  00          Output Option
3:  4001        MMMP Mux & Probe Selection
4:  100         Waveform Averaging
5:  1.0         Vp
6:  256         Points
7:  16.5        Cable Length (meters)
8:  4           Window Length (meters)
9:  0.145       Probe Length (meters)
10: 0.022       Probe Offset (meters)
11: 3           Loc [ c           ]
12: 1.0         Mult
13: 0.0         Offset

```

```

15:  Z=X*Y (P36)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 3      Y Loc [ c      ]
    3: 3      Z Loc [ c      ]

16:  Z=X*F (P37)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 0.01244 F
    3: 3      Z Loc [ c      ]

17:  Z=X^Y (P47)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 4      Y Loc [ d      ]
    3: 3      Z Loc [ c      ]

18:  Z=X+F (P34)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: -0.1948 F
    3: 3      Z Loc [ c      ]

19:  Z=X*F (P37)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 1.13723 F
    3: 3      Z Loc [ c      ]

20:  Do (P86)
    1: 10      Set Output Flag High (Flag 0)

21:  Z=Z+1 (P32)
    1: 5      Z Loc [ e      ]

22:  Real Time (P77)
    1: 111      Day,Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

23:  Sample (P70)
    1: 1      Reps
    2: 1      Loc [ a      ]

24:  Sample (P70)
    1: 1      Reps
    2: 2      Loc [ b      ]

25:  Sample (P70)
    1: 1      Reps
    2: 3      Loc [ c      ]

26:  Sample (P70)
    1: 1      Reps
    2: 5      Loc [ e      ]

*Table 2 Program
    02: 0.0000      Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

```


Program for five TDR probes

```
;{CR10X}
;Written with EDLOG program by A. Alaoui - 2004
;Five diagonal TDR probes
;Water content is calculated directly according to Roth
(1990)
;Probe length = 0.15 m
*Table 1 Program
    01: 30          Execution Interval (seconds)

1:  TDR100 Measurement (P119)
    1: 00          SDM Address
    2: 00          Output Option
    3: 2001        MMMP Mux & Probe Selection
    4: 100         Waveform Averaging
    5: 1.0         Vp
    6: 256         Points
    7: 16.5        Cable Length (meters)
    8: 4           Window Length (meters)
    9: 0.145       Probe Length (meters)
   10: 0.022       Probe Offset (meters)
   11: 1           Loc [ a          ]
   12: 1.0        Mult
   13: 0.0        Offset

2:  Z=F (P30)
    1: 0.46        F
    2: 00          Exponent of 10
    3: 7           Z Loc [ f          ]

3:  Z=X*Y (P36)
    1: 1           X Loc [ a          ]
    2: 1           Y Loc [ a          ]
    3: 1           Z Loc [ a          ]

4:  Z=X*F (P37)
    1: 1           X Loc [ a          ]
    2: 0.01244     F
    3: 1           Z Loc [ a          ]

5:  Z=X^Y (P47)
    1: 1           X Loc [ a          ]
    2: 7           Y Loc [ f          ]
    3: 1           Z Loc [ a          ]

6:  Z=X+F (P34)
    1: 1           X Loc [ a          ]
    2: -0.1948     F
    3: 1           Z Loc [ a          ]

7:  Z=X*F (P37)
    1: 1           X Loc [ a          ]
    2: 1.13723     F
    3: 1           Z Loc [ a          ]
```

```

8:  TDR100 Measurement (P119)
1:  00          SDM Address
2:  00          Output Option
3:  3001        MMMP Mux & Probe Selection
4:  100         Waveform Averaging
5:  1.0         Vp
6:  256         Points
7:  16.5        Cable Length (meters)
8:  4           Window Length (meters)
9:  0.145       Probe Length (meters)
10: 0.022       Probe Offset (meters)
11: 2           Loc [ b          ]
12: 1.0         Mult
13: 0.0         Offset

9:  Z=X*Y (P36)
1:  2           X Loc [ b          ]
2:  2           Y Loc [ b          ]
3:  2           Z Loc [ b          ]

10:  Z=X*F (P37)
1:  2           X Loc [ b          ]
2:  0.01244     F
3:  2           Z Loc [ b          ]

11:  Z=X^Y (P47)
1:  2           X Loc [ b          ]
2:  7           Y Loc [ f          ]
3:  2           Z Loc [ b          ]

12:  Z=X+F (P34)
1:  2           X Loc [ b          ]
2:  -0.1948     F
3:  2           Z Loc [ b          ]

13:  Z=X*F (P37)
1:  2           X Loc [ b          ]
2:  1.13723     F
3:  2           Z Loc [ b          ]

14:  TDR100 Measurement (P119)
1:  00          SDM Address
2:  00          Output Option
3:  4001        MMMP Mux & Probe Selection
4:  100         Waveform Averaging
5:  1.0         Vp
6:  256         Points
7:  16.5        Cable Length (meters)
8:  4           Window Length (meters)
9:  0.145       Probe Length (meters)
10: 0.022       Probe Offset (meters)
11: 3           Loc [ c          ]
12: 1.0         Mult
13: 0.0         Offset

```

```

15:  Z=X*Y (P36)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 3      Y Loc [ c      ]
    3: 3      Z Loc [ c      ]

16:  Z=X*F (P37)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 0.01244 F
    3: 3      Z Loc [ c      ]

17:  Z=X^Y (P47)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 7      Y Loc [ f      ]
    3: 3      Z Loc [ c      ]

18:  Z=X+F (P34)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: -0.1948 F
    3: 3      Z Loc [ c      ]

19:  Z=X*F (P37)
    1: 3      X Loc [ c      ]
    2: 1.13723 F
    3: 3      Z Loc [ c      ]

20:  TDR100 Measurement (P119)
    1: 00      SDM Address
    2: 00      Output Option
    3: 5001    MMMP Mux & Probe Selection
    4: 100     Waveform Averaging
    5: 1.0     Vp
    6: 256     Points
    7: 16.5    Cable Length (meters)
    8: 4       Window Length (meters)
    9: 0.145   Probe Length (meters)
   10: 0.022   Probe Offset (meters)
   11: 4       Loc [ d      ]
   12: 1.0     Mult
   13: 0.0     Offset

21:  Z=X*Y (P36)
    1: 4      X Loc [ d      ]
    2: 4      Y Loc [ d      ]
    3: 4      Z Loc [ d      ]

22:  Z=X*F (P37)
    1: 4      X Loc [ d      ]
    2: 0.01244 F
    3: 4      Z Loc [ d      ]

23:  Z=X^Y (P47)
    1: 4      X Loc [ d      ]
    2: 7      Y Loc [ f      ]
    3: 4      Z Loc [ d      ]

```

```

24:  Z=X+F (P34)
    1: 4      X Loc [ d      ]
    2: -0.1948 F
    3: 4      Z Loc [ d      ]

25:  Z=X*F (P37)
    1: 4      X Loc [ d      ]
    2: 1.13723 F
    3: 4      Z Loc [ d      ]

26:  TDR100 Measurement (P119)
    1: 00      SDM Address
    2: 00      Output Option
    3: 6001    MMMP Mux & Probe Selection
    4: 100     Waveform Averaging
    5: 1.0     Vp
    6: 256     Points
    7: 16.5    Cable Length (meters)
    8: 4       Window Length (meters)
    9: 0.145   Probe Length (meters)
   10: 0.022   Probe Offset (meters)
   11: 5       Loc [ e      ]
   12: 1.0     Mult
   13: 0.0     Offset

27:  Z=X*Y (P36)
    1: 5      X Loc [ e      ]
    2: 5      Y Loc [ e      ]
    3: 5      Z Loc [ e      ]

28:  Z=X*F (P37)
    1: 5      X Loc [ e      ]
    2: 0.01244 F
    3: 5      Z Loc [ e      ]

29:  Z=X^Y (P47)
    1: 5      X Loc [ e      ]
    2: 7      Y Loc [ f      ]
    3: 5      Z Loc [ e      ]

30:  Z=X+F (P34)
    1: 5      X Loc [ e      ]
    2: -0.1948 F
    3: 5      Z Loc [ e      ]

31:  Z=X*F (P37)
    1: 5      X Loc [ e      ]
    2: 1.13723 F
    3: 5      Z Loc [ e      ]

32:  Do (P86)
    1: 10      Set Output Flag High (Flag 0)

33:  Z=Z+1 (P32)

```

```

1: 8          Z Loc [ g          ]

34: Real Time (P77)
1: 111        Day,Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

35: Sample (P70)
1: 1          Reps
2: 1          Loc [ a          ]

36: Sample (P70)
1: 1          Reps
2: 2          Loc [ b          ]

37: Sample (P70)
1: 1          Reps
2: 3          Loc [ c          ]

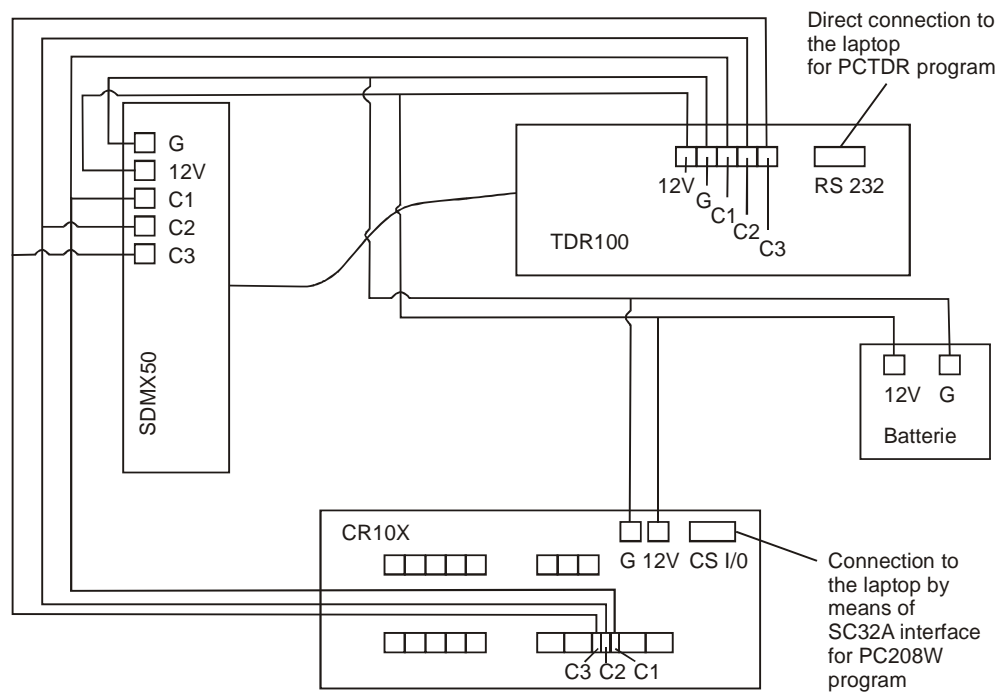
38: Sample (P70)
1: 1          Reps
2: 4          Loc [ d          ]

39: Sample (P70)
1: 1          Reps
2: 5          Loc [ e          ]

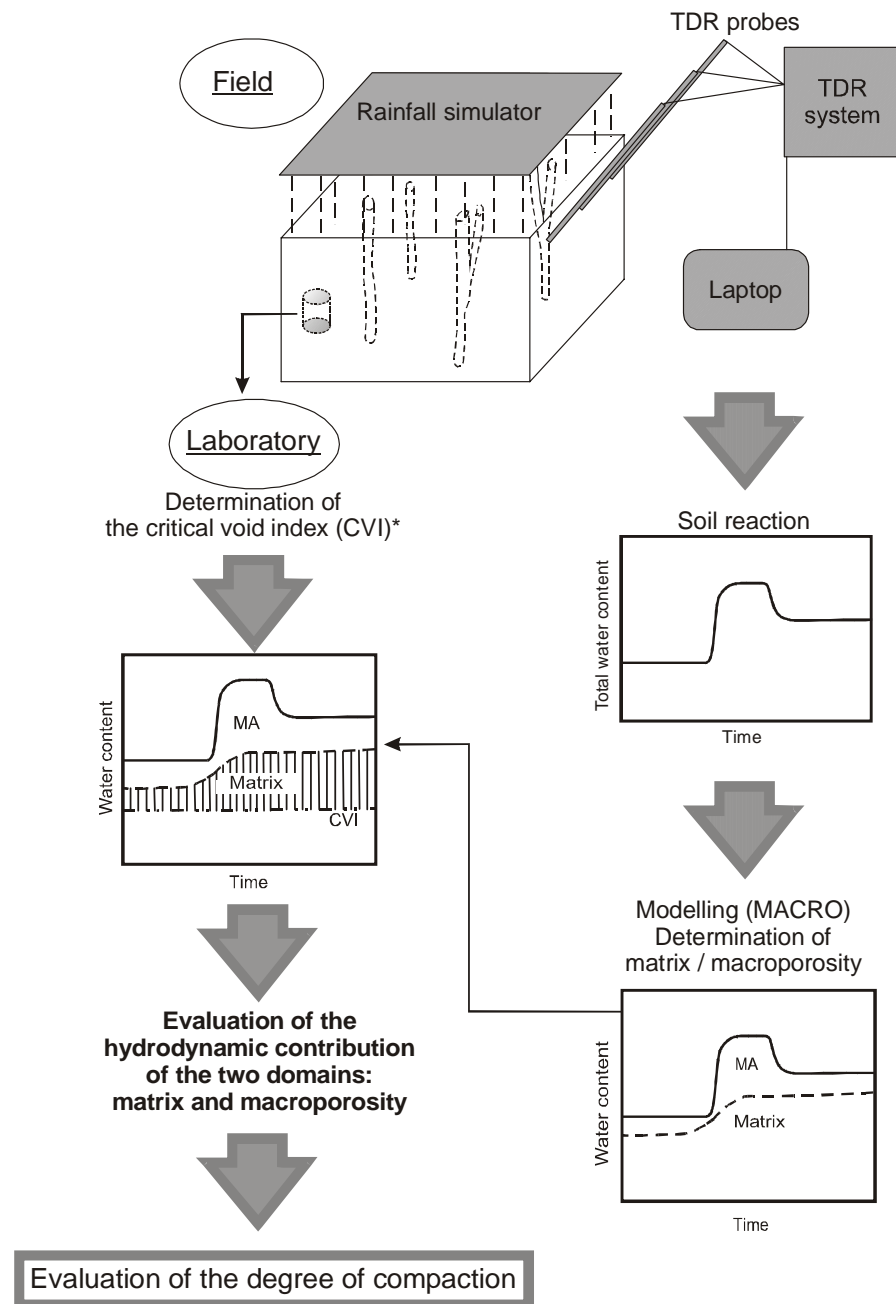
40: Sample (P70)
1: 1          Reps
2: 8          Loc [ g          ]

```

A2: TDR system: Connection between TDR system components



A3: Proposed methodology to investigate a dual-porosity medium



* To avoid the laboratory step for each investigation, it is necessary to establish CVI for each soil texture.

Index

1 Liste des figures

Figure 1	Organisation et planification du travail: principales étapes	12
Figure 2	Composantes du système TDR	16
Figure 3	Communication entre multiplexeurs et réflectromètre TDR100; attribution des adresses SDM en relation avec les positions des MSD et LSD du multiplexeur	17
Figure 4	Sonde utilisée pour la mesure de la teneur en eau	18
Figure 5	Forage diagonal des trous d'accès pour les sondes	21
Figure 6	Mise en place des tubes provisoires en PVC pour maintenir la stabilité des parois des trous; exemple de 5 profondeurs; A) insertion du tube, B) tubes insérés en une rangée ne dépassant pas 1 mètre	22
Figure 7	Menu principal du programme PCTDR pour la calibration des sondes TDR (<i>Campbell Scientific, Inc., 2000–2001</i>)	24
Figure 8	Menu principal du programme PC208W (<i>Campbell Scientific, Inc., 2000–2001</i>)	25
Figure 9	Menu de configuration de la communication entre le <i>datalogger</i> et le PC-portable (<i>Campbell Scientific, Inc., 2000–2001</i>)	25
Figure 10	Menu de connexion (<i>Campbell Scientific, Inc., 2000–2001</i>)	26
Figure 11	Dispositif de mesure: A) simulateur de pluie, B) système TDR, C) sondes TDR insérées obliquement selon un angle de 45°	28
Figure 12	Schéma d'installation des sondes TDR; 1-2: tube en PVC installé pour stabiliser le trou, 3-5: installation de la sonde TDR	29
Figure 13	Composantes et installation du simulateur de pluie – UNI Berne	33
Figure 14	Evacuation de l'air contenu dans les tuyaux	34
Figure 15	Menu pour la visualisation de la courbe de la teneur en eau (<i>Campbell Scientific, Inc.</i>)	35
Figure 16	Exemples de réaction du sol suite à une irrigation; 1) sol compacté, 2) sol intact; cas de Frauenfeld	37
Figure 17	Compaction affectant la matrice du sol; courbe 1: teneur en eau mesurée; courbe 2: limite entre matrice et macropores déterminée par le modèle MACRO; courbe 3: limite de compression de référence obtenue par le test de compression oedométrique; MA: macroporosité	38
Figure 18	Evolution des profils de teneurs en eau à 0.20, 0.40, 0.50 et 0.70 m durant les deux essais d'infiltration. Comparaison entre sol intact et sol compacté; t = 0 min correspond au début de l'irrigation; région de Frauenfeld	40
Figure 19	Réseau de points de mesure sélectionnés pour les essais d'infiltration à Grenchen; à chaque point, la teneur en eau a été mesurée à 5 profondeurs	42
Figure 20	Exemples de réaction du sol à Grenchen. Point 10: sol compacté; point 5: sol reconstruit non compacté	43

Figure 21	Emplacement du terrain d'investigation à Kirchberg. Carte reproduite avec l'autorisation de l'office fédéral de topographie (JD042503)	45
Figure 22	Réaction du sol compacté de Kirchberg à une série d'irrigations	47
Figure 23	Réaction du sol reconstruit de Kirchberg à une série d'irrigations	48
Figure 24	Evolution des teneurs en eau à la surface du sol (0.20 – 0.30 m) pour les points 1, 2, 5 et 9: confrontation entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées par le modèle MACRO; la limite de la compaction maximale a été obtenue par des mesures oedométriques; Kirchberg, Rüdltigen (Berne)	49

2 Liste des tableaux

Tableau 1	Emplacement des appareils de mesure	20
Tableau 2	Caractéristiques des essais d'irrigation; région de Frauenfeld	40
Tableau 3	Augmentation de la teneur en eau lors des deux essais d'irrigation $\Delta\theta=(\theta_{\max}-\theta_{\text{init}})$ et temps correspondant Δt sur le sol témoin non compacté à Frauenfeld, t_0 est le temps du début de l'irrigation, t_1 est le temps pour atteindre θ_{\max} . L'erreur sur le temps est de 5 min	41
Tableau 4	Caractéristiques des macropores déterminées par les essais de traçage	48
Tableau 5	Classification de la compaction du sol dans un milieu à double porosité	51

3 Références bibliographiques

- Acutis M., Mdaghri-Alaoui A., Jarvis N. & Donatelli M., 2001. A Software for Sensitivity Analysis, Calibration and Inversion of MACRO Model. Modeling Cropping Systems, 2nd *International Symposium*, Florence, Italy, July 16–18, 2001.
- Alaoui A., 2002. Evaluation du tassement du sol par l'étude de l'évolution hydrodynamique de la teneur en eau: Mise au point d'une méthode non destructive. Rapport, *OFEFP – UNI Berne*, institut de géographie, section des sols, Berne, 14 pp.
- Alaoui A., Germann P., Jarvis N. & Acutis M., 2003. Dual-porosity and Kinematic Wave Approaches to assess the degree of preferential flow in unsaturated porous media. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3): 455–472.
- Alaoui A., Helbling A. & Germann P., 2004. Etude de la compaction des sols par des mesures hydrodynamiques de la teneur en eau, région de Kirchberg (Berne). *Rapport, OFEFP – UNI Berne*, institut de géographie, section des sols, Berne, 19 pp.
- Brooks R. H. & Corey A. T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper* no. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27 pp.
- Campbell Scientific, Inc., 2000. CR10X Measurements and Control Module, Instruction Manual, issued 28.01.00.
- Campbell Scientific, Inc., 2001. TDR100 Instruction Manual 2000–2001.
- Guerif J., Richard G., Dürr C., Machet J.M., Recous S., Roger-Estrade J., 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Tillage Res.*, 61: 13–32.
- Jarvis N. J., 1994. The MACRO model Version 3.1 - Technical description and sample simulations. *Reports and Dissertations* no. 19, Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 51 pp.
- Mdaghri-Alaoui A., 1998. Transferts d'eau et de substances (bromures, chlorures et bactériophages) dans des milieux non saturés à porosité bimodale: Expérimentation et modélisation. *Thèse de doctorat*, Section des Sols, Institut de Géographie, Université de Berne, 154 pp.
- Mdaghri-Alaoui A., & Germann P., 2000. Evaluation du tassement du sol par la méthode TDR (Time Domain Reflectometry), Région de Frauenfeld, Suisse. *Rapport interne*, université de Berne, institut de géographie, section des sols, Berne, 11 pp.
- Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 513–522.
- Richards L. A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics* 1, 318–333.
- Roth K., Schuln R., Flühler H. & Attinger W., 1990. Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach. *Water Resour. Res.*, 26(10): 2267–2273.

4 Remerciements

Peter Germann (UNI Berne):

support financier et scientifique

Daniel Zürcher (OFEFP) :

support financier OFEFP et coordination

Jean-Pierre Clément (OFEFP) :

support technique

Werner Rohr (Geotest), Pascal Boivin (EPFL), Peter Lüscher (WSL),

Samuel Isler (BSF-Zürich):

groupe d'accompagnement

Andréas Helbling, Matthias Kuratli, Urs Bieri (UNI Berne):

travaux de terrain

Martin Zürcher (myx GmbH):

collaboration

Lyesse Laloui, Gilbert Gruaz (LMS - EPFL, Lausanne):

tests oedométriques.

Fam. Lehmann (Rüdtligen, Kirchberg):

autorisation des essais